

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DA SOLDAGEM PLASMA COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE  
ARAME PARA APLICAÇÃO EM REVESTIMENTOS METÁLICOS**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**MOISÉS ALVES DE OLIVEIRA**

**FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2001**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

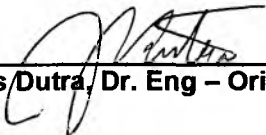
**ESTUDO DA SOLDAGEM PLASMA COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE**  
**ARAME PARA APLICAÇÃO EM REVESTIMENTOS METÁLICOS**

**MOISÉS ALVES DE OLIVEIRA**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE

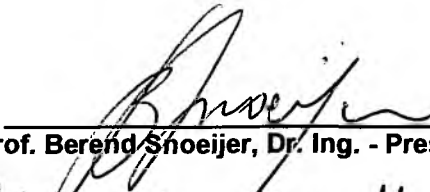
**MESTRE EM ENGENHARIA**

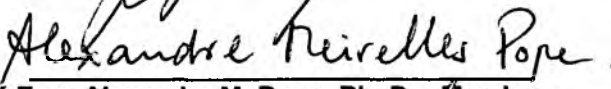
**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**SENDO APROVADA EM SUA FORMA FINAL.**

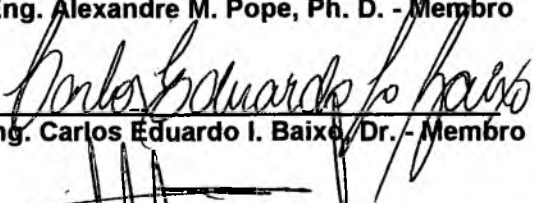
  
Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng – Orientador

  
Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng – Coordenador do Curso

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof. Berend Shoenijer, Dr. Ing. - Presidente

  
Eng. Alexandre M. Pope, Ph. D. - Membro

  
Eng. Carlos Eduardo I. Baixo, Dr. - Membro

  
Prof. Ramón S. Cortés Paredes, Dr. Eng. - Membro

*“Se você observar um homem verdadeiramente feliz, verá que ele está construindo um barco, escrevendo uma sinfonia, cultivando dâlias em seu jardim ou procurando ovos de dinossauro no deserto de Gobi. Esse homem não procura a felicidade como se ela fosse um botão que rolou para baixo de um móvel; não a considera como um fim em si: descobre que é feliz no decurso de sua vida, durante 24 bem preenchidas horas do dia.”*

*D. Béran Wolfe.*

**À minha esposa Nalinle.  
Aos nossos pais Albertina e Ermes, Nara e Milton.  
À nossa família.**

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos às pessoas que colaboraram na realização deste trabalho, em especial:

- Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação, apoio e amizade.
- Ao Eng. Raul Gohr Jr., companheiro no desenvolvimento de equipamentos da bancada, e nas horas de lazer.
- Ao Eng. Carlos Eduardo I. Baixo, pelas orientações durante a execução do trabalho;
- Ao Eng. Fernando Ribas, Vanderlei e Itamar, e à Tractebel Energia, pelo apoio técnico e financeiro;
- Ao Prof. Buschinelli e sua equipe;
- Aos colegas e amigos José Eduardo Guiçardi, Marcus Barnetche, Jean Vieira, Valério Quadros e Tiago Cunha, que muito me ajudaram nas experiências;
- Aos amigos Denise Donin e ao Pablo Arruda, pela amizade e paciência.
- Ao CNPq e ao projeto ROBOTURB/FINEP pela concessão de bolsas e financiamentos;
- Ao amigo Larry Fiori Ollé, que sempre mostrou conhecimento e, principalmente, disposição e prazer em auxiliar em todos os sentidos. O seu exemplo de força e dedicação estará sempre presente em nossa trajetória e em nossas vidas (*In Memorium*).

LISTA DE FIGURAS .....	IX
SIMBOLOGIA .....	XII
RESUMO .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - O PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS .....	3
2.1 - INTRODUÇÃO .....	3
2.2 - O ARCO PLASMA .....	3
2.3 - ABERTURA DO ARCO PLASMA E TIPOS DE ARCO .....	6
3 - PARÂMETROS, VARIÁVEIS E CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO PLASMA .....	9
3.1 - DISTÂNCIA TOCHA/PEÇA (DTP) .....	9
3.2 - TIPOS E VAZÕES DE GÁS .....	11
3.2.1 - Gás de Plasma .....	11
3.2.2 – Gás de Proteção .....	12
3.3 - RECUO DO ELETRODO E DIÂMETRO DO ORIFÍCIO CONSTRITOR .....	13
3.4 - EFICIÊNCIA TÉRMICA .....	14
3.5 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA .....	16

<b>4 - O PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA COM MATERIAL DE ADIÇÃO.....</b>	<b>17</b>
4.1 – PULVERIZAÇÃO TÉRMICA.....	17
4.2 – PULVERIZAÇÃO TÉRMICA COM MATERIAL DE ADIÇÃO NA FORMA DE ARAME - “WIRE ARC PLASMA” .....	17
4.2 - BRASAGEM POR PLASMA .....	20
4.3 - SOLDAGEM PLASMA COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME .....	20
4.3.1 - Adição de Arame de Forma Manual.....	20
4.3.2 - Adição Automática de Arame.....	21
4.3.2 – b - Arame Pré-Aquecido (“Hot Wire”).....	26
<b>5 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>27</b>
5.1 - JUSTIFICATIVAS .....	27
5.2 - OBJETIVOS .....	28
<b>6 - EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
6.1 – EQUIPAMENTOS.....	30
6.1.1 – Fonte de soldagem MTE Digitec 450 .....	30
6.1.2 – Módulo Plasma.....	31
6.1.3 – Cabeçote Tracionador de Arame STA-TIG .....	31
6.1.4 – Pistola de Soldagem Plasma Adaptada .....	31
6.1.5 – Sistema de Deslocamento de Pistola TARTÍLOPE V1.....	34
6.1.6 – Sistema de Aquisição e Monitoramento de Grandezas de Soldagem.....	35
6.1.6 – Bancada de Filmagem .....	36
6.2 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	37
6.2.1 – Ensaios de Soldagem PLASMA sem Adição de Material.....	37
6.2.2 – Ensaios de Soldagem PLASMA com Alimentação Automática de Arame. ....	38

<b>7 - RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>43</b>
7.1 – INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA TOCHA/PEÇA SOBRE A TENSÃO DO ARCO PLASMA E LARGURA DA ZONA FUNDIDA.....	43
7.2 – ENSAIOS PRELIMINARES COM ADIÇÃO DE ARAME DE AÇO CARBONO ABNT 1020 .....	49
7.3 – PLASMA COM ADIÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME DE AÇO INOXIDÁVEL AWS 309-L .....	52
7.4 – PLASMA COM ADIÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME DE AÇO INOXIDÁVEL LIGADO AO COBALTO (CAVITEC) .....	64
7.5 – ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE MISTURA DE ARGÔNIO/CO <sub>2</sub> COMO GÁS DE PROTEÇÃO.....	65
7.6 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO PLASMA COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME .....	70
<b>8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>74</b>
<b>9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>76</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação Esquemática do Processo de Soldagem TIG	4
Figura 2.2	Representação Esquemática do Processo Plasma	5
Figura 2.3	Representação Esquemática do Arco Piloto e Arco Transferido	8
Figura 3.1	Tensão do Arco em Função da Distância Tocha/Peça para Soldagem Plasma pela Técnica Keyhole	10
Figura 3.2	Vazão de Gás de Plasma	12
Figura 3.3	Recuo do Eletrodo e Diâmetro do Orifício Constritor	14
Figura 3.4	Principais Mecanismos da Transferência de Calor para a Poça de Fusão	15
Figura 3.5	Rendimento Térmico do Arco para os Processos de Soldagem	16
Figura 3.6	Distribuição de Temperatura no Arco Plasma	16
Figura 4.1	Princípio Básico de Operação do WAP	18
Figura 4.2	Foto da Formação e Aceleração das Partículas no Processo WAP	19
Figura 4.3	Taxa de Deposição de Material	19
Figura 4.4	Tocha Plasma com Direcionador de Arame	21
Figura 4.5	Oscilograma de Tensão para Velocidade Ideal de Arame	22
Figura 4.6	Oscilograma de Tensão para uma Baixa Velocidade do Arame	23
Figura 4.7	Oscilograma de Tensão para Excessiva Velocidade do Arame	23
Figura 4.8	Comparação entre os Processos MIG e TIG Baseada na Corrente Média	25
Figura 4.9	Comparação entre os Processos MIG e TIG Baseada na Potência do Arco	25
Figura 4.10	Desenho Esquemático do Plasma Plus	26
Figura 6.1	Dimensões da Tocha PWH – 4A	32

Figura 6.2	Pistola de Soldagem Plasma Adaptada	33
Figura 6.3	Grau de Liberdade ( $\theta_1$ ) do Suporte Direcionador de Arame	34
Figura 6.4	SAP-1	35
Figura 6.5 a	Arame Direcionado a Meia Altura	39
Figura 6.5 b	Arame Direcionado na Poça de Fusão	39
Figura 6.6 a	Frente	39
Figura 6.6 b	Ré	39
Figura 6.7	Início da Faixa de Velocidade Ótima	40
Figura 6.8	Final da Faixa de Velocidade Ótima	41
Figura 6.9	Soldagem na Posição Sobrecabeça	42
Figura 7.1	Influência de DTP e R sobre a Tensão do Arco Plasma	44
Figura 7.2	Tensão do Arco em Função de R	44
Figura 7.3	Influência do Comprimento do Arco Sobre a Tensão no Processo TIG	46
Figura 7.4	Influência de DTP e de VGP sobre a Largura da Zona Fundida	47
Figura 7.5	Influência do Comprimento do Arco Sobre a Largura do Cordão no Processo TIG	47
Figura 7.6	Velocidade Ideal do Arame x Corrente	51
Figura 7.7	Velocidade Ótima do Arame x Corrente	53
Figura 7.8	Oscilograma de Tensão Arame/Peça Faixa de 60 a 120 A	54
Figura 7.9	Velocidade Ótima do Arame x Corrente	55
Figura 7.10	Pequenas Gotas Repelidas	56
Figura 7.11	Oscilograma de Tensão da Transferência Goticular Axial	57
Figura 7.12	Formação de Gotas Acima do Limite Superior	58
Figura 7.13	Oscilograma de Tensão na Transferência de Gotas Grandes por Tensão Superficial	58
Figura 7.14	Velocidade Ótima do Arame x Corrente	59
Figura 7.15	Registro Fotográfico da Transferência Filamentar	60
Figura 7.16	Oscilograma da Transferência Filamentar	61
Figura 7.17	Formas de transferência em função da corrente e velocidade do arame	62

Figura 7.18	Faixa de Velocidade Ótima do Arame para Diversas VGP's	63
Figura 7.19	Velocidade Ótima do Arame Tubular de Aço Inoxidável Ligado ao Cobalto	65
Figura 7.20	Cordão de Solda Confeccionado com Argônio Puro como Gás de Proteção	66
Figura 7.21	Depósito de Aço Inoxidável Ligado ao Cobalto com Defeitos de Porosidade	67
Figura 7.22	Cordão de Solda Confeccionado com Mistura de 96% de Ar + 4% de CO <sub>2</sub>	68
Figura 7.23	Cordão de Solda de Aço Inoxidável 309-L Confeccionado na Posição Sobrecabeça com Mistura de Ar + CO <sub>2</sub> no Gás de Proteção	68
Figura 7.24	Depósito de Cordões Lado a Lado, Utilizando Arame AWS 309-L	69
Figura 7.25	Ensaio de Líquidos Penetrantes em Amostra de Deposição de CAVITEC com Mistura Ativa no Gás de Proteção	70
Figura 7.26	Taxa de Deposição dos Processo TIG, MIG/MAG e Plasma em Função da Corrente do Arco	71
Figura 7.27	Taxa de Deposição dos Processo TIG, MIG/MAG e Plasma em Função da Potência do Arco	72

## SIMBOLOGIA

$\phi$	-	Diâmetro do orifício constritor
$\eta_{\alpha}$	-	Eficiência do arco
$\eta_{\phi}$	-	Eficiência de Fusão
$^{\circ}\text{C}$	-	Grau Celcius
A	-	ampère
Ar	-	argônio
AWS	-	“American Welding Society”
cm	-	centímetro ( $10^{-2}$ metros)
$\text{CO}_2$	-	Dióxido de Carbono
DTP	-	Distância Tocha/Peça
$E_a$	-	Energia total do arco elétrico
$E_p$	-	Energia absorvida pela peça
$E_{zf}$	-	Energia utilizada para formação da zona fundida
g	-	grama
K	-	kelvin
k	-	kilo ( $10^3$ )
l/min	-	litros por minuto
m	-	metro
MAG	-	“Metal Active Gas”
MIG	-	“Metal Inert Gas”
min	-	minuto
mm	-	milímetro ( $10^{-3}$ metros)
$\text{O}_2$	-	Oxigênio
R	-	Recuo do Eletrodo
TF	-	Transferência Filamentar
TGA	-	Transferência Goticular Axial
TIG	-	“Tungsten Inert Gas”
TTS	-	Transferência por Tensão Superficial
V	-	volt
VGP	-	Vazão de Gás de Plasma
W	-	watt
WAP	-	“Wire Arc Plasma”
ZAC	-	Zona Afetada pelo Calor

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o processo de soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame com ênfase para a sua utilização no recobrimento de superfícies metálicas. Para um melhor embasamento dos conhecimentos e para melhor caracterização do processo plasma, foram realizados ensaios iniciais sem material de adição. Algumas variáveis do processo foram analisadas, como a influência da distância do bocal constritor em relação à peça de soldagem e do recuo do eletrodo sobre a tensão do arco, bem como as características geométricas da zona fundida. Foram realizados também ensaios de simples deposição com adição de arame de aço inoxidável 309-L e CAVITEC nas posições plana e sobrecabeça. Na soldagem sem adição de material, os resultados mostraram que a tensão do arco plasma e a geometria da zona fundida sofrem influência da distância bocal/peça e do recuo do eletrodo, em proporções muito semelhantes ao processo TIG. Na soldagem com deposição de material, são apresentadas relações entre corrente de soldagem e taxa de deposição, para diferentes posicionamentos do arame, em relação ao arco voltaico, bem como para diferentes sentidos de alimentação do arame. É apresentada, também, uma diferente forma de transferência de material, denominada neste trabalho de “transferência filamental”. Este tipo de transferência, alcançada na deposição de Aço Inoxidável 309-L, caracteriza-se pela formação de um fluxo contínuo de material, onde o arame, ainda na forma sólida, se encontra com o arco voltaico, funde-se e se transfere, sem interrupções, formando uma ponte de metal líquido entre a ponta de arame sólido e a poça fundida. A “Transferência Filamental” mostrou excelente estabilidade e isenção total de respingos nas posições plana, vertical e sobrecabeça. São apresentadas, também, relações entre corrente, vazão de gás de plasma e velocidade do arame que garantem a ocorrência da transferência filamental no aço inoxidável 309-L e que garantem uma transferência estável de material para o arame CAVITEC. O processo de soldagem Plasma apresentou excelentes características de estabilidade nos ensaios de deposição de material, mostrando um grande potencial para sua utilização em operações de revestimento, como, por exemplo, a recuperação de rotores de turbinas hidráulicas erodidos por cavitação.

## ABSTRACT

In this work is presented an investigation concerning the Plasma Arc Welding Process with Automatic Wire Feeding (PAW-Cold Wire), mainly for its utilization in the recovering of metallic surfaces. For a stronger basis of knowledge and a more precise characterization of the plasma process, preliminary trials with no filler metal were carried out. In this experiments the influence of torch standoff and electrode setback on the arc voltage and fused zone geometry were analyzed. Essays of simple deposition were also performed, with the addition of stainless steel wire AWS ER 309-L and CAVITEC in flat and overhead positions.

In the welding without filler metal, the results showed that the plasma arc voltage and the geometry of the fused zone undergo the influence of torch standoff and of electrode setback, very similar in proportions to those of the Gas Tungsten Arc Welding Process. In welding with deposition of material, relations appear between the welding current and deposition rate for different positions of the wire in relation to the voltaic arc, as well as for different directions of wire feeding. A different way of transferring material is also presented, named in this work as "filament transfer". This type of transfer, achieved by replacing AWS ER 309-L, is characterized by the formation of a continuous flow of material, in which the wire, still in solid form, shows a voltaic arc, fuses and transfers, without interruptions, forming a liquid metal bridge between the solid wire edge and the weld pool. "Filament Transfer" showed excellent stability and complete absence of spatter in the flat, vertical and overhead positions. Relations among current, plasma gas flow rate and the wire velocity are also presented. Such relations guarantee the occurrence of filament transfer in the ER 309-L, as well as providing a stable transfer of material to the CAVITEC wire. The PAW-Cold Wire showed excellent characteristics of stability in essays of deposition of material, revealing a great potential for its utilization in recovering operations, such as the recuperation of hydraulic turbine rotors eroded by cavitation.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUÇÃO**

Os estudos da soldagem PLASMA iniciaram na década de 50, quando Robert Gage, pesquisador da Union Carbide Corporation descobriu que as características do arco TIG poderiam ser modificadas pela constrição do arco.

Desde então, a soldagem PLASMA vem evoluindo, em termos de aplicações e equipamentos, tornando-se um processo utilizado em operações que exigem qualidade e responsabilidade. Várias são as vantagens apontadas pela literatura técnica que o PLASMA possui sobre os outros processos de soldagem a arco, entretanto, sua utilização ainda abrange uma pequena parcela na indústria metal mecânica.

Ao longo dos últimos cinco anos o LABSOLDA/UFSC vem estudando o processo PLASMA através de estudos sistemáticos, procurando sempre promover sua aplicação em vários setores da indústria. Estes estudos resultaram em dissertações de mestrado, trabalhos técnicos e algumas aplicações em campo.

Inserido neste contexto, o estudo do processo de soldagem PLASMA com alimentação automática de arame tenta desenvolver conhecimento técnico e científico e, simultaneamente, possibilitar aplicações em campo onde predominam os processos que utilizam eletrodo consumível.

Um exemplo de aplicação que reflete este fato está localizado no setor de geração de energia elétrica, mais precisamente na recuperação de rotores de turbinas hidráulicas erodidos por cavitação. A cavitação é capaz de remover material das pás dos rotores, exigindo paradas regulares, para recuperar a superfície, repondo o material perdido através de soldagem ao arco elétrico. Os dois processos de soldagem utilizados nestes trabalhos são o Eletrodo Revestido e o MIG/MAG.

O LABSOLDA/UFSC já possui tradição no desenvolvimento de pesquisas relacionadas à recuperação de turbinas hidráulicas. Prova disto foi o desenvolvimento do processo MIG/MAG Pulsado Com Pulsação Térmica, já utilizado com sucesso em algumas usinas hidroelétricas do país. Recentemente o Departamento de Engenharia Mecânica e o Departamento de Controle e Automação

da UFSC, juntamente com a COPEL/LACTEC começaram o desenvolvimento de um robô especialmente projetado para realizar a recuperação dos rotores atingidos pela cavitação. O LABSOLDA exerce importante função neste desenvolvimento, pois é responsável por especificar os processos e procedimentos de soldagem que venham a ser utilizados pelo robô. Procurando melhores resultados em termos de produtividade e qualidade dos depósitos, linhas de pesquisa foram criadas para estudar os processos TIG com Alimentação Automática de Arame e o MIG/MAG Duplo Arame. O PLASMA com Alimentação Automática de Arame também mostrou-se uma alternativa viável para os trabalhos de recuperação, passando a ser uma das linhas de pesquisa do LABSOLDA.

Este trabalho é realizado dentro do contexto descrito acima e analisa características gerais do PLASMA com alimentação automática de arame, tendo como principal motivação sua utilização na recuperação de turbinas hidráulicas erodidas por cavitação.



## **CAPÍTULO II**

### **O PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS**

#### **2.1 - INTRODUÇÃO**

Robert Gage, ao estudar a constrição do arco TIG, tinha a intenção de utilizá-lo em operações de cortes de metais. Pesquisas posteriores revelaram a possibilidade de utilização de tal processo também para operações de soldagem, sendo que na década de 60, os Estados Unidos realizaram a primeira aplicação do processo, soldando partes do foguete TITAN III-c [1].

Atualmente, o processo é amplamente utilizado, de forma manual ou automática, na soldagem e corte de vários metais e também na soldagem de materiais não metálicos. De acordo com a literatura, o arco na soldagem PLASMA é bastante estável, de alta densidade de energia e o cordão de solda é pouco afetado pela distância da tocha de soldagem em relação à peça. Devido à sua grande estabilidade e excelente controle de energia, o processo pode ser usado na soldagem de chapas de espessura muito pequena, inferior a 1 mm, até espessuras de 7 mm em passe único sem necessidade de chanframento [1,2].

Em virtude do processo PLASMA estar vinculado originalmente com o processo TIG, são realizadas, ao longo do presente trabalho, uma série de comparações entre ambos.

#### **2.2 - O ARCO PLASMA**

Apesar de muitos estudos realizados, os conhecimentos obtidos não permitiram ainda um entendimento global dos fenômenos físicos envolvidos no arco voltaico, também chamado de arco elétrico, em função de sua complexidade, o que tem dificultado o estabelecimento de modelos matemáticos precisos. Entretanto, as informações já obtidas e algumas simplificações permitem que o arco elétrico seja usado eficientemente em soldagem, se constituindo na fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão na atualidade.

O arco voltaico consiste em uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado a alta temperatura chamado PLASMA, produzindo energia térmica suficiente para ser usado em soldagem, através da fusão localizada das peças a serem unidas [2].

No processo de soldagem TIG o arco voltaico é estabelecido entre um eletrodo de tungstênio e a peça de soldagem, através de um gás inerte ou misturas de gases inertes. Na maior parte dos casos, o eletrodo de tungstênio é o terminal negativo e a peça se constitui no terminal positivo do circuito elétrico, o que caracteriza a polaridade direta. A figura 2.1 apresenta, de forma esquemática, uma tocha utilizada no processo TIG.

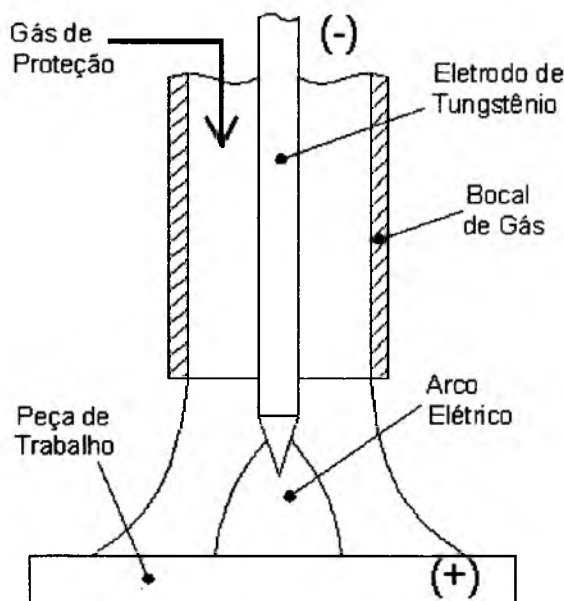


Figura 2.1 – Representação Esquemática do Processo de Soldagem TIG

O arco elétrico do processo TIG apresenta uma geometria espacial cônica, boa estabilidade e excelente controle da energia. A diferença de potencial entre as extremidades do arco, necessária para manter a descarga elétrica, varia com a distância entre os eletrodos, chamada de comprimento do arco, com a geometria e material dos eletrodos, tipo de gás de proteção e corrente que atravessa o arco [1,2].

O processo de soldagem PLASMA analisado sob o ponto de vista de suas características físicas, pode ser considerado como uma derivação do processo de soldagem TIG, pois os elementos básicos são fundamentalmente os mesmos. Difere do processo TIG principalmente pelo fato do arco estar restringido por um bocal

constritor que limita o seu diâmetro e aumenta consideravelmente a densidade de energia. Também na soldagem ao arco PLASMA são utilizados dois fluxos de gás, iguais ou diferentes. O primeiro, freqüentemente argônio (Ar) e denominado de “Gás de Plasma”, circunda o eletrodo e sai por um orifício no bocal constritor na forma de um jato de gás. O segundo fluxo serve para proteção e passa por um bocal externo, concêntrico ao bocal constritor. Este gás pode ser inerte ou uma mistura de gases. A figura 2.2 ilustra, de forma esquemática, uma tocha de soldagem utilizada neste processo [1,2].

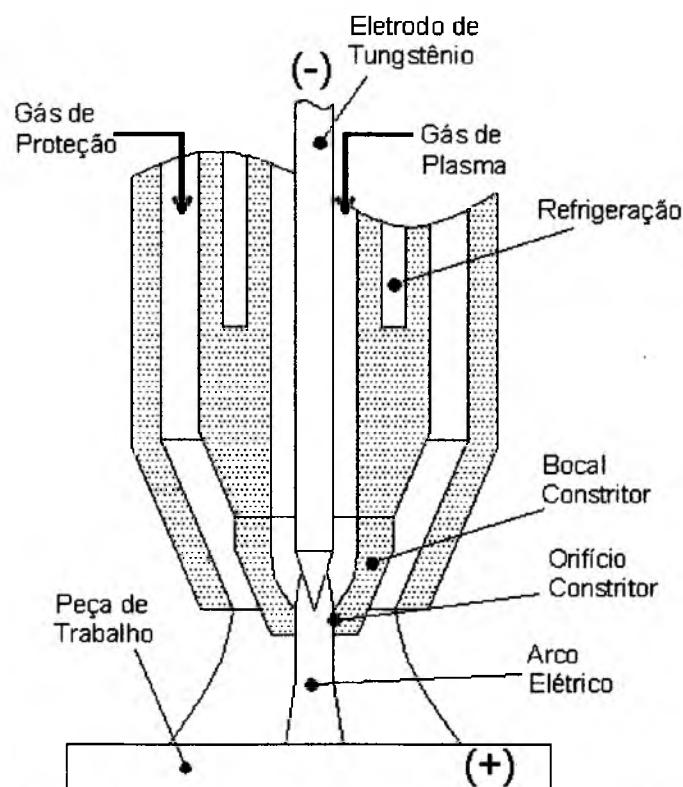


Fig. 2.2 – Representação Esquemática do Processo PLASMA

O bocal constritor influencia para que a área da seção transversal do arco não sofra uma variação muito grande ao longo de sua extensão, desde a sua saída do orifício constritor até o material base, mesmo que ocorram pequenas variações na distância tocha-peça. Esta seria uma das diferenças marcantes entre o processo PLASMA e o TIG. Vários autores afirmam que tal constrição do arco é responsável por uma série de vantagens conferidas ao processo PLASMA, das quais pode-se citar [3,4]:

- Mesmo com correntes baixas, o arco é estável;
- A coluna do arco é rígida e de reduzido diâmetro, produzindo poça de fusão de tamanho relativamente reduzido e estreita zona afetada pelo calor;
- Como consequência do item anterior, a tendência à distorção é muito menor;
- A velocidade de soldagem pode ser mais elevada que no processo TIG;
- O comprimento do arco exerce pequeno efeito sobre a tensão.

A soldagem de peças através do processo PLASMA pode ser realizada de dois modos, bastante distintos, para uma ampla faixa de espessuras de chapas. Na soldagem pela técnica "Melt-in" o arco PLASMA é usado como fonte de calor para fundir o metal de adição (quando requerido) e o metal de base, com relativamente pequena ação de penetração. É a soldagem usual por fusão, tal como é realizada no processo TIG. Outra maneira de soldar através do PLASMA é pela técnica "Keyhole" (Buraco de Fechadura). Neste modo, é formada uma pequena poça de fusão com um furo passante através do metal de base. Esta condição resulta da adequada combinação da vazão do gás de plasma, corrente do arco, velocidade de soldagem e vazão do gás de proteção. Com o movimento da tocha, o metal fundido pelo arco é forçado a fluir ao redor do jato de plasma e para trás, onde a poça de fusão está se solidificando. Através desta técnica, pode-se realizar soldas em chapas espessas sem chanfro com a garantia de total penetração e menor nível de defeitos [5].

### **2.3 - ABERTURA DO ARCO PLASMA E TIPOS DE ARCO**

No processo TIG é possível proceder a abertura do arco elétrico através de toque entre o eletrodo e a peça de soldagem. Este toque - curto circuito - libera energia suficiente e criar condições para a ionização do gás de proteção, devido ao aquecimento localizado do eletrodo de tungstênio. Outra forma de abertura do arco é através de um ignitor de alta frequência, que impõe picos de alta tensão entre o eletrodo e a peça, capazes de provocar a ionização do gás de proteção, promovendo, assim, a abertura do arco.

Como no processo PLASMA o eletrodo fica “enclausurado”, normalmente a abertura do arco não é realizada através de toque. Assim o uso do ignitor de alta frequência é o método usual na abertura do arco neste processo. Este ignitor gera picos de tensão entre o eletrodo e o bocal constritor, provocando um pequeno faiscamento que gera condições para que seja estabelecido um arco elétrico de baixa intensidade, denominado de “arco piloto”. O arco piloto é estabelecido entre o eletrodo e o bocal constritor através do gás de plasma, liberando energia suficiente para aquecer e ionizar este gás conferindo-lhe características de um plasma.

Em função dos valores baixos de corrente, o Arco Piloto não possui energia suficiente para promover a fusão e união de peças. Entretanto, quando são utilizados maiores valores de corrente no arco piloto, podendo chegar a casa das centenas de amperes, maior energia é liberada ao gás, promovendo um fluxo contínuo de plasma de alta energia. Nestas condições, o Arco Piloto passa a ser denominado de Arco não Transferido.

Alguns tipos de equipamento PLASMA utilizam apenas o arco não transferido para operações de soldagem. Neste caso, como não há passagem de corrente entre o eletrodo e a peça, a fusão do material base é feita exclusivamente pelo calor transferido pelo jato de gás a alta temperatura. O fato de a peça não ser parte integrante do circuito elétrico permite operações de solda de materiais não condutores de eletricidade [1].

Em outra modalidade da soldagem PLASMA, é estabelecido um arco voltaico entre o eletrodo e a peça de soldagem, denominado de Arco Transferido ou Arco Principal. O arco piloto exerce fundamental importância no estabelecimento do arco transferido. O jato de plasma gerado pelo arco piloto, em contato com a peça de soldagem, se torna uma espécie de condutor elétrico conectando-a ao eletrodo de tungstênio. Portanto, para promover a passagem de eletricidade através do jato de plasma, basta impor uma diferença de potencial entre o eletrodo e a peça de soldagem, estabelecendo assim o arco transferido. Neste caso, o calor é transferido à peça pela mancha anódica sobre ela, assim como pelo jato de plasma. Em função destas características, o arco transferido, por sua própria natureza, cede maior energia para a peça, se tornando o tipo de arco mais utilizado na soldagem de metais. O arco piloto e o arco transferido são representados na figura 2.3.

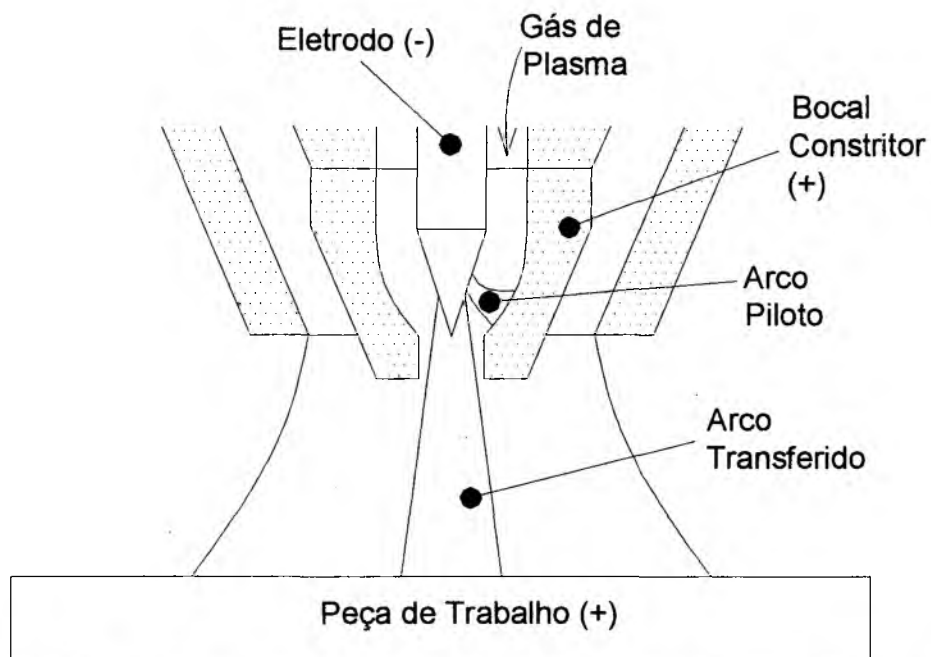


Fig. 2.3 – Representação Esquemática do Arco Piloto e do Arco Transferido

## **CAPÍTULO III**

### **PARÂMETROS, VARIÁVEIS E CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO PLASMA**

Neste capítulo é feita uma breve revisão bibliográfica das principais características do processo de soldagem PLASMA, abordando de forma crítica os conceitos clássicos apresentados pela literatura.

#### **3.1 - DISTÂNCIA TOCHA/PEÇA (DTP)**

De uma forma geral, a bibliografia consultada aponta como uma das principais características do processo de soldagem PLASMA sua pouca sensibilidade em relação à distância da tocha à peça de trabalho (DTP). Esta peculiaridade permitiria ao processo a realização de soldas de largura homogênea mesmo com mudanças no comprimento do arco. Esta importante característica é atribuída à forma cilíndrica do arco voltaico e, por consequência, ao baixo gradiente de densidade de energia ao longo de sua coluna. Porém, as afirmações sobre esta baixa sensibilidade do processo raramente são traduzidas em números ou comparações quantitativas entre os diferentes processos de soldagem. Mesmo em quatro décadas de utilização da soldagem PLASMA, são raros os trabalhos precisos e detalhados sobre a verdadeira influência de DTP nas características do cordão de solda, utilizando as diversas técnicas de soldagem. Os trabalhos apenas rotulam o processo como insensível a variações no comprimento do arco e como um processo de alta densidade de energia.

Paula Jr [5], num destes raros trabalhos, procurou analisar a influência de DTP sobre as características da zona fundida em soldagem de aço carbono pela técnica keyhole e apresenta algumas informações mais precisas sobre o assunto. Em seus estudos, cordões de aspecto satisfatório com penetração total e uniforme foram obtidos com DTP de 2 a 6 mm. Nesse trabalho também foi detectado um ligeiro aumento da ZAC com o aumento na distância tocha peça, sendo que a justificativa apresentada para tal fato foi a mudança da geometria espacial do arco

PLASMA, de uma forma cilíndrica para uma forma ligeiramente cônica à medida em que se aumenta DTP. Esta hipótese também sustenta a explicação para a ocorrência de zonas fundidas mais largas em maiores distâncias tocha/peça.

No mesmo trabalho foi constatada significativa influência de DTP sobre a tensão do arco voltaico. Para DTP de 2 mm, a tensão medida ficou em torno de 30 V e para 10 mm, obteve-se o valor de 35,6 V.

Diaz [1] também realizou estudos da soldagem por PLASMA pela técnica keyhole, e obteve resultados muito próximos aos obtidos por Paula Jr, no que se refere à influência de DTP sobre a tensão do arco voltaico. Seus resultados podem ser visualizados com o auxílio da fig. 3.1.

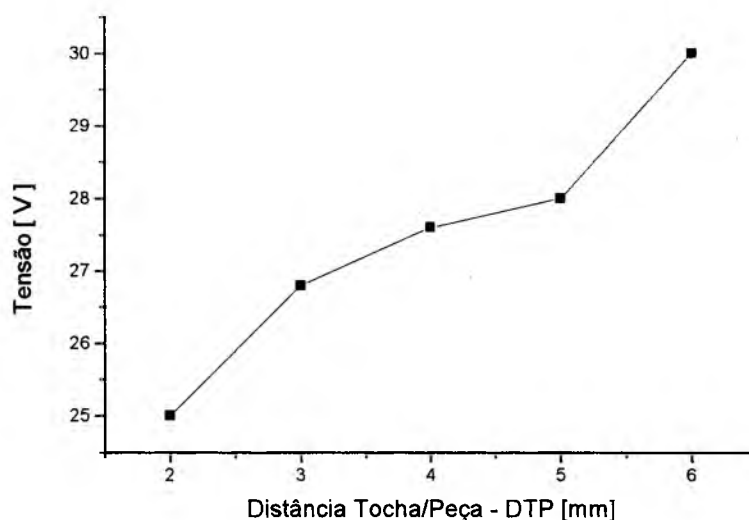


Fig. 3.1 – Tensão do Arco e Largura do Cordão para Soldagem PLASMA pela Técnica Keyhole

Diaz observou que o aumento excessivo de DTP resulta na perda das características do arco, que se torna cônico. Neste caso, o cordão da solda apresenta uma largura maior com raiz mais estreita. Por outro lado, a utilização de uma DTP muito reduzida pode causar o contato entre o bocal constritor e a superfície da poça fundida, inutilizando-o.

Os trabalhos escritos por Diaz e Paula Jr. trazem importantes informações a respeito do comportamento do PLASMA quando ocorrem variações no comprimento do arco. Porém, são resultados válidos apenas para a soldagem pela técnica keyhole nos valores de corrente e vazão de gás de plasma estudados.



## **3.2 - TIPOS E VAZÕES DE GÁS**

### **3.2.1 - Gás de Plasma**

Argônio com 99,99 % de pureza é utilizado como gás de plasma em soldagens com correntes acima de 20 A. É de custo relativamente baixo e comumente encontrado no comércio. Na soldagem com correntes inferiores a 20 A, onde se caracteriza o processo microplasma, é exigido um gás de maior pureza (99,995%) devido a características de maior sensibilidade do processo.

O argônio promove um arco piloto de boa estabilidade e cordões de boa qualidade. Seu potencial de ionização relativamente baixo permite a abertura e transferência do arco voltaico com certa facilidade. Também uma mistura de argônio com hidrogênio pode ser utilizada para promover um arco voltaico de maior energia e promover maior penetração.

A vazão do gás de plasma tem um efeito significativo no comportamento da poça fundida, na qualidade do cordão de solda e na velocidade de soldagem. O aumento na vazão de gás de plasma provoca o aumento da velocidade do jato de plasma na saída do bocal de constrição, resultando num acréscimo da pressão do arco sobre a poça de fusão. À medida que os níveis de vazão são elevados, há um aumento na relação penetração/largura do cordão [1]. Valores ainda maiores de vazão de gás de plasma provocam penetração total e até mesmo o corte do material.

A literatura técnica cita que a vazão do gás de plasma recomendada para as aplicações mais comuns varia de 0,25 a 5,00 l/min. Esta faixa é recomendada para garantir a qualidade da solda, que pode ser prejudicada pela excessiva pressão do jato sobre a poça fundida. O fabricante da tocha de soldagem utilizada neste trabalho especifica uma relação entre vazão de gás de plasma e corrente de soldagem para garantir não só a qualidade da solda, como também a integridade física da tocha de soldagem. Sob circunstâncias especiais, o fabricante da tocha utilizada na condução do presente trabalho admite maiores vazões de gás, de acordo com as necessidades de cada operação de soldagem (fig. 3.2) [6].

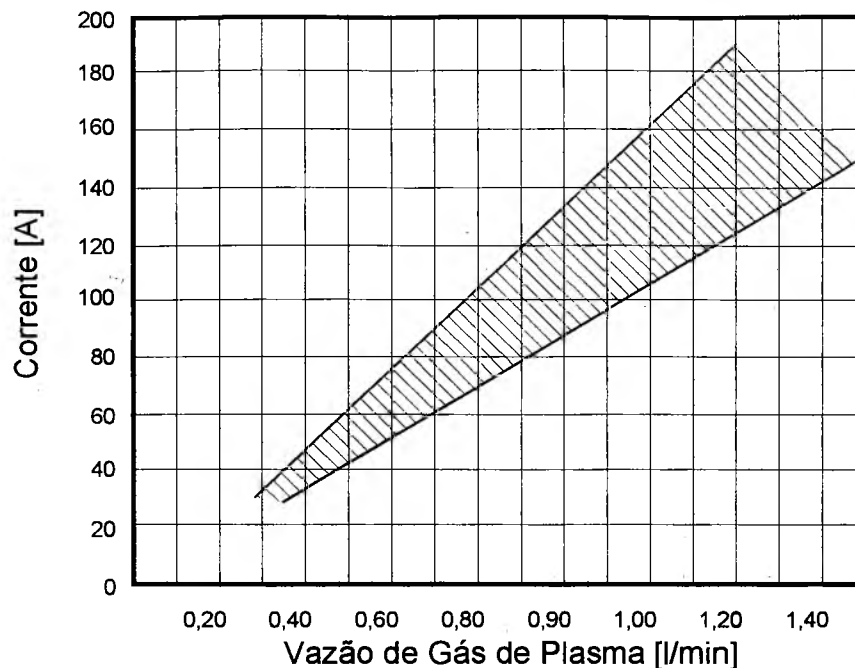


Fig. 3.2 – Vazão de Gás de Plasma [6]

Nos estudos do PLASMA com adição automática de arame, serão utilizados maiores níveis de vazões de gás do que é recomendado pelo fabricante para cada valor de corrente (fig. 3.2).

### 3.2.2 – Gás de Proteção

Para muitas aplicações em soldagem PLASMA, o gás de proteção é freqüentemente o mesmo utilizado como gás de plasma. A seleção do tipo de gás é estabelecida em função do material a ser soldado e das características desejadas para o cordão de solda. Embora tenha a função primordialmente mecânica de proteger a solda, dependendo de suas propriedades físicas, o tipo do gás de proteção pode afetar o arco e as propriedades mecânicas da solda [5].

Argônio com 99,99% de pureza, devido a sua natureza de gás inerte, pode ser utilizado também como gás de proteção na soldagem de qualquer liga metálica e materiais reativos. Tradicionalmente, o uso de argônio puro como gás de proteção apresenta pouca fluidez da poça fundida, o que pode permitir a ocorrência de depósitos de baixa molhabilidade na soldagem com metal de adição.

A utilização de hélio como gás de proteção não é muito comum, apesar do arco voltaico nesta atmosfera apresentar maior energia e proporcionar maior

penetração. O alto custo do hélio pode ser uma das possíveis razões para sua baixa utilização. Outro motivo para esta baixa utilização do hélio como gás de proteção se localiza na maior tensão do arco nesta atmosfera, o que dificulta sua abertura e estabilização.

A mistura de argônio e hélio poderia ser uma boa alternativa para agregar o baixo custo e as características de abertura de arco e estabilidade do argônio com a maior concentração de energia do Hélio. Porém, tal melhoria nas características do arco só são observadas em misturas com mais de 40% de hélio [6].

A utilização bem sucedida no processo MIG/MAG de misturas de Argônio com CO<sub>2</sub> motivaram a experimentação, no presente trabalho, do comportamento da soldagem PLASMA usando esta mistura como gás de proteção, mesmo sendo raros os trabalhos encontrados sobre a utilização de gases ativos no processo de soldagem PLASMA.

### **3.3 - RECUO DO ELETRODO E DIÂMETRO DO ORIFÍCIO CONSTRITOR**

O recuo do eletrodo é determinado pela distância entre sua ponta e a face externa do bocal constritor (fig 3.3).

Combinações entre valores de recuo (R) do eletrodo e diâmetro do orifício constritor ( $\phi$ ) determinam o grau de constrição do arco. Maior recuo do eletrodo e menor diâmetro do orifício constritor resultam em um maior grau de constrição, provocando um arco mais concentrado. Isto implica numa menor relação largura/penetração. Para um valor menor de recuo do eletrodo, aliado a um orifício constritor de diâmetro maior, o grau de constrição diminui, resultando em um arco de menor densidade de energia e, por sua vez, um aumento na relação largura/penetração [1,2 e 5].

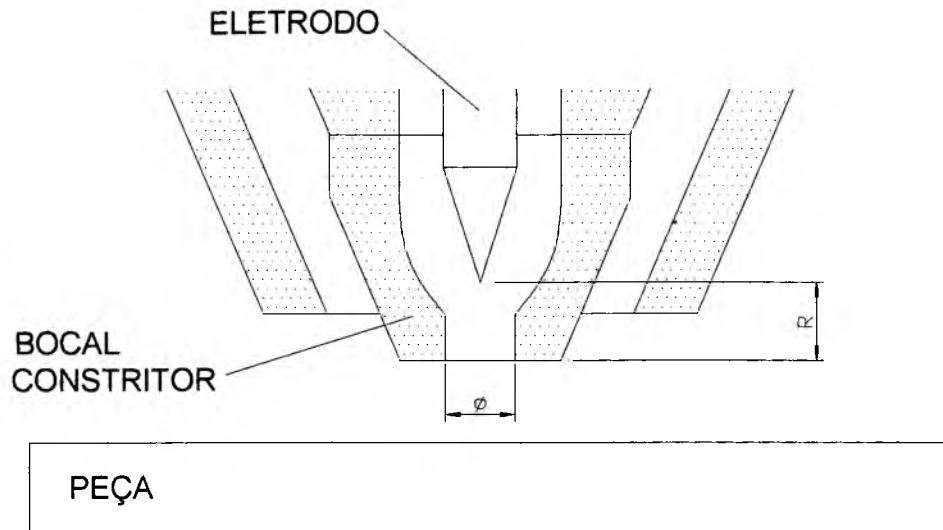


Fig. 3.3 – Recuo do Eletrodo e Diâmetro do Orifício Constritor

### 3.4 - EFICIÊNCIA TÉRMICA

A eficiência térmica nos processos de soldagem a arco é dividida em duas parcelas: eficiência do arco e eficiência de fusão. A eficiência do arco ( $\eta_a$ ) é calculada através da fração de energia absorvida pela peça de soldagem ( $E_p$ ) em relação à energia total do arco elétrico ( $E_a$ ). Já a eficiência de fusão ( $\eta_f$ ) é calculada como a fração de energia utilizada para a formação da zona fundida ( $E_{zf}$ ) em relação à energia recebida pela peça de soldagem ( $E_p$ ), como mostram as equações 3.1 e 3.2. A energia total do arco elétrico é calculada através do produto da corrente pela tensão. A energia necessária para a formação da zona fundida depende de seu volume e das propriedades físicas do material fundido. A energia absorvida pela peça de soldagem é medida através de calorímetros específicos para corpos de prova soldados [7 e 8].

A figura 3.4, extraída do trabalho conduzido por Evans em 1998 [8], apresenta os mecanismos dominantes da transferência de calor para a poça de fusão.

$$\eta_a = \frac{E_p}{E_a} \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$\eta_f = \frac{E_f}{E_p} \quad (\text{Equação 3.2})$$

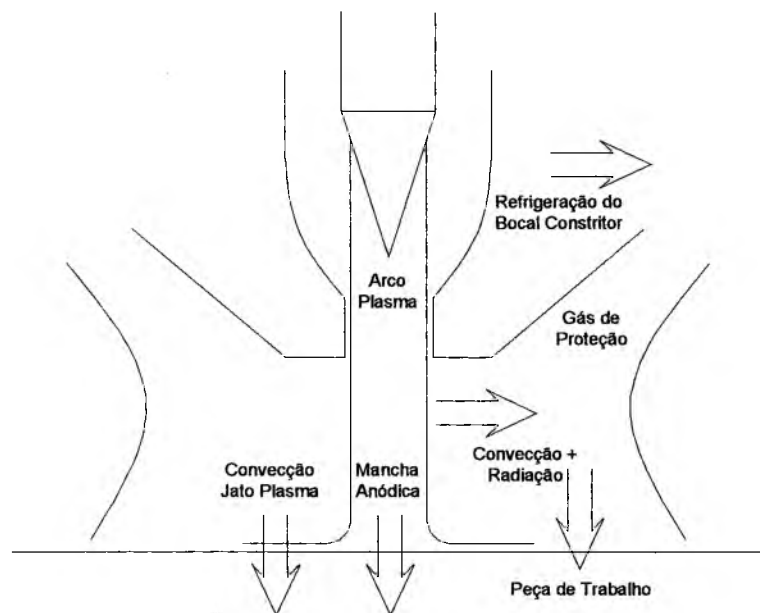


Fig. 3.4 – Principais Mecanismos da Transferência de Calor para a Poça de Fusão [8].

Processos que utilizam eletrodo consumível, como é o caso do MIG/MAG e do Arco Submerso, apresentam maiores rendimentos térmicos do que os processos que utilizam eletrodo permanente, como mostra a figura 3.5. A explicação sugerida por DuPont [7] é que os processos que utilizam eletrodo consumível transmitem a energia gerada em seus eletrodos para a peça, enquanto que nos processos com eletrodo permanente isto não ocorre. O menor rendimento apresentado pelo PLASMA em relação ao TIG se deve, segundo DuPont, ao calor retirado do arco através do bocal constritor e seu sistema de refrigeração, sempre presente nas tochas PLASMA.

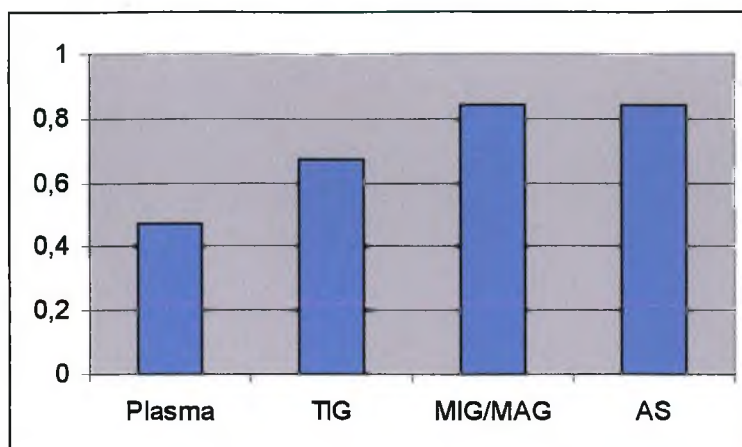


Fig. 3.5 – Rendimento Térmico do Arco para os Processos de Soldagem [7].

### 3.5 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA

O Welding Handbook [4] e Rudaz [9] apresentam uma distribuição de temperatura com gradientes radiais e axiais ao longo do arco PLASMA. Analisando a fig. 3.6 nota-se que a temperatura aumenta à medida em que se aproxima do eletrodo e do centro da coluna do arco.

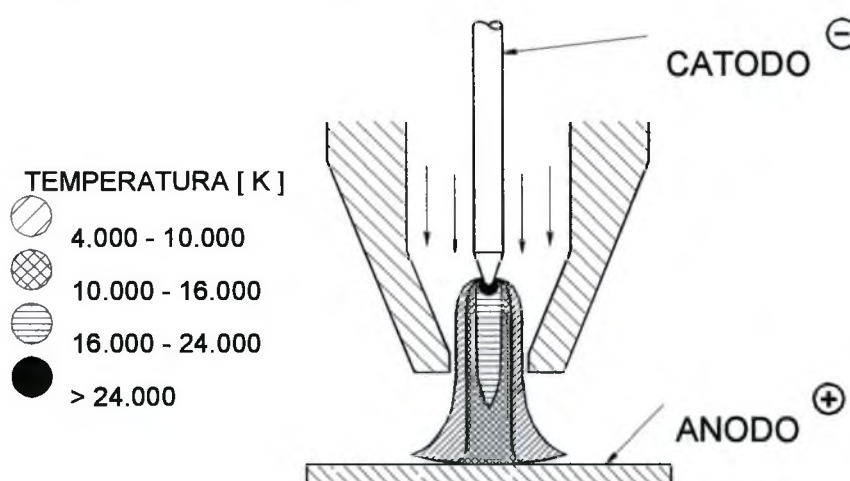


Fig. 3.6 – Distribuição de Temperatura no Arco PLASMA [4 e 9]

Esta distribuição de temperaturas é influenciada pelas seguintes variáveis:

- Corrente do Arco;
- Vazão e tipo do gás de plasma
- Comprimento do Arco
- Diâmetro e tipo do bocal constritor

## **CAPÍTULO IV**

### **O PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA COM MATERIAL DE ADIÇÃO**

Similarmente ao que acontece no processo TIG, a soldagem por PLASMA pode ser realizada com metal de adição, dependendo das características geométricas da junta soldada, espessura da chapa e tipo de metal de base. O PLASMA também é utilizado em operações de revestimento através de adição de metal fundido e de pulverização térmica (adição de pó).

#### **4.1 – PULVERIZAÇÃO TÉRMICA**

Este é um processo que permite o revestimento de superfícies com uma camada relativamente fina a partir da pulverização de pó de materiais metálicos ou cerâmicos. A pulverização térmica por plasma foi desenvolvida visando atender as exigências apresentadas pela indústria aeroespacial, quando se tornaram necessários revestimentos de alta qualidade com certos carbonetos e óxidos cerâmicos sobre turbinas e motores de foguetes, bem como pelas indústrias químicas e de geração de energia. Na pulverização térmica utiliza-se o arco não transferido com correntes na faixa de 100 a 1000 A, potências de 12 a 100 kW e diâmetro médio das partículas do pó de revestimento entre 0,02 e 0,1 mm [5].

#### **4.2 – PULVERIZAÇÃO TÉRMICA COM MATERIAL DE ADIÇÃO NA FORMA DE ARAME - “WIRE ARC PLASMA”**

O processo “Wire Arc Plasma Spray” (WAP) utiliza um arco plasma transferido estabelecido entre o eletrodo não consumível (catodo) e o arame de adição (anodo), que é alimentado externamente ao bocal constritor. O pequeno tamanho das partículas geradas neste processo, aliado a sua alta temperatura resultam em revestimentos com excelentes níveis de adesão e resistência [10].

O princípio de operação do WAP é ilustrado na figura 4.1, onde é representada, de forma esquemática, a seção transversal da pistola utilizada no processo. Um arco transferido é estabelecido entre o eletrodo e a ponta do arame que é continuamente alimentado em direção ao orifício do bocal constritor. As partículas fundidas geradas a partir do arame são inicialmente aceleradas pela própria força do arco e velocidade do plasma. Em seguida, o fluxo secundário de gás promove uma maior convergência no “spray” (plasma + partículas fundidas) e acelera as partículas a velocidades supersônicas (fig. 4.2).

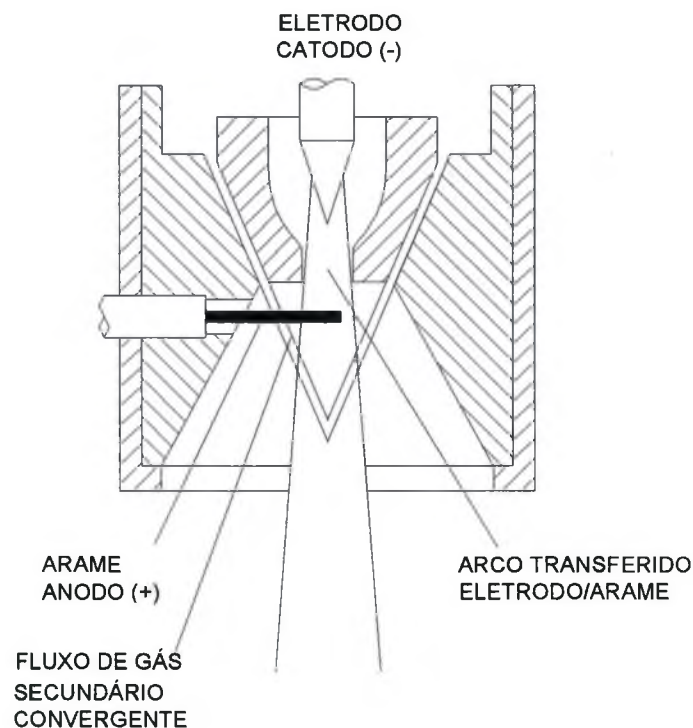


Fig. 4.1– Princípio Básico de Operação do WAP



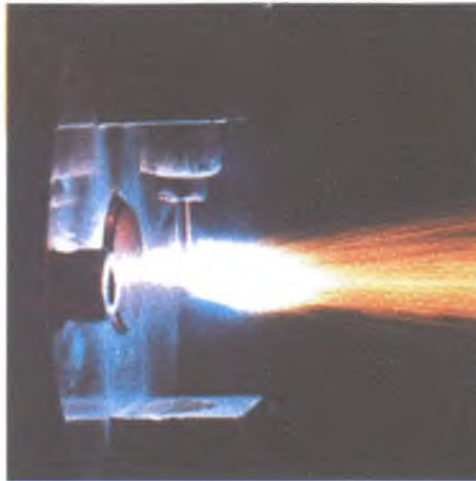


Fig. 4.2 – Foto da Formação e Aceleração das Partículas no Processo WAP

Uma das vantagens do WAP é a possibilidade de posicionar a ponta do arame de adição dentro dos limites físicos do plasma para uma determinada energia selecionada. Conseguindo controlar esta posição relativa do arame no plasma, pode-se atuar na atomização e temperatura das partículas e, por consequência, na microestrutura do revestimento. A figura 4.3 mostra a taxa de deposição de material em função da corrente utilizada e da posição da ponta do arame em relação ao plasma [10]. O limite inferior é definido no instante em que a ponta sólida do arame penetra na coluna do arco voltaico. Já o limite superior é determinado quando a ponta sólida do arame atinge o outro extremo do arco voltaico. A linha traço-ponto do gráfico representa a taxa de deposição que proporciona o posicionamento central da ponta sólida do arame em relação à coluna do arco voltaico para uma determinada corrente.

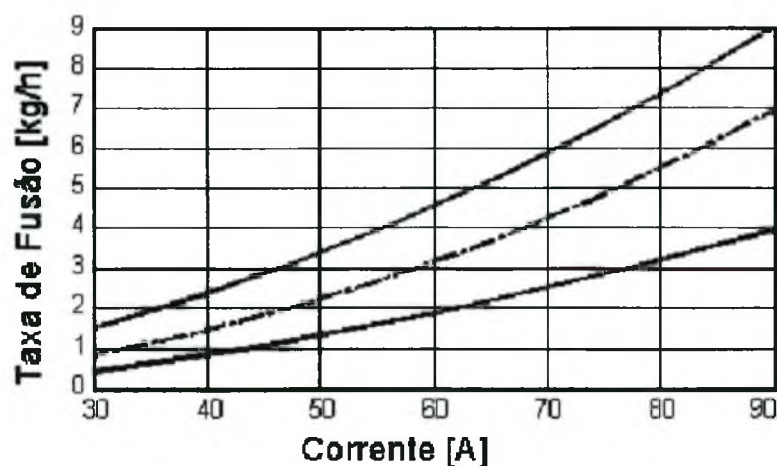


Fig. 4.3 – Taxa de Deposição de Material

## **4.2 - BRASAGEM POR PLASMA**

Este é um processo relativamente recente, utilizado na soldagem da carroceria de alguns carros e de componentes do seu conjunto. O processo anteriormente utilizado era a brasagem por MIG, que apresentava problemas relevantes, tais como distorções nas chapas soldadas em virtude da pequena espessura (0,9 mm) e da faixa de corrente requerida (90 a 100 A), além de apresentar níveis elevados de porosidade.

A brasagem por PLASMA, utilizando arco transferido ou não transferido, apresenta a possibilidade de ajustar de forma independente a corrente e a velocidade de alimentação do arame, permitindo que correntes menores de 50 A sejam empregadas para brasar componentes de espessura igual a 0,9 mm. A taxa de deposição é da ordem de 1,5 kg/h para arame de 0,8 mm de diâmetro. Menores distorções e ausência de respingos são outras vantagens proporcionadas pelo processo, bem como a eliminação quase que total de porosidades [5].

## **4.3 - SOLDAGEM PLASMA COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME**

No processo de soldagem PLASMA, a adição de material pode ser realizada na forma de varetas, as mesmas utilizadas para o processo TIG de forma manual, ou pode ser realizada de forma automática, utilizando arame bobinado.

### **4.3.1 - Adição de Arame de Forma Manual**

Na adição de material de forma manual, as características do processo são muito semelhantes à soldagem TIG com adição de metal, onde o soldador conduz a pistola de soldagem com uma das mãos, e com a outra mão faz a adição de material. Nesta forma de soldagem podem ser atingidos bons níveis de qualidade no cordão de solda, já que existe bom controle do aporte de energia e da adição de material. Contudo, é um processo lento, onde a taxa de alimentação, medida em

kg/h se torna baixa, comprometendo a utilização do processo em operações que exigem maior produção.

#### **4.3.2 - Adição Automática de Arame**

A adição automática de arame é uma alternativa melhor quando se deseja aliar qualidade e taxa de produção nos processos TIG e PLASMA. Nesta situação, é adicionado material na forma de arame bobinado, em muitos casos, o mesmo utilizado no processo MIG/MAG. O arame é movimentado até a tocha de soldagem através de um cabeçote tracionador, de forma contínua com velocidade controlada. Ao chegar na pistola de soldagem, o arame é conduzido ao arco voltaico através de um sistema direcionador (fig. 4.4).

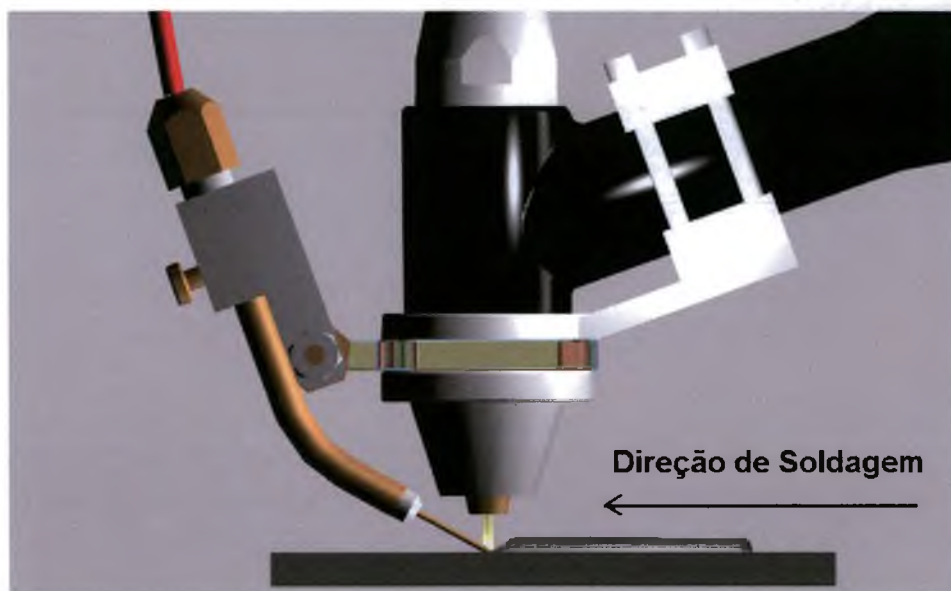


Fig. 4.4 – Tocha PLASMA com Direcionador de Arame

Atualmente existem dois tipos distintos de alimentação de arame utilizados nos processos TIG e PLASMA, denominados: "Cold Wire" (Arame Frio) e "Hot Wire" (Arame Pré-aquecido).

#### 4.3.2 – a - Arame Frio (“Cold Wire”)

No processo “Cold Wire” o arame de adição é alimentado a temperatura ambiente sendo que a velocidade do arame está relacionada, basicamente, com a corrente utilizada no arco voltaico. Delgado [11] levantou uma série de correlações entre velocidade do arame, corrente e energia do arco voltaico, utilizando critérios de estabilidade para a transferência metálica de arame frio para o processo TIG. Em seu trabalho, o arame foi direcionado para a base do arco voltaico e em contato com a poça de fusão.

Crítérios foram estabelecidos para definir a taxa ótima de alimentação de arame em função da corrente imposta ao arco voltaico. Quando o arame é fundido de forma contínua e transferido para a poça, sem interrupções, por efeito da tensão superficial, se considera que a taxa de alimentação está otimizada em relação à corrente utilizada. Um indicativo de tal estabilidade é o oscilograma de tensão do arco TIG, que se mostra estável quando a velocidade do arame atinge um valor ideal para uma determinada corrente. A figura 4.5 mostra um exemplo de oscilograma de tensão para uma taxa ótima de alimentação de arame.

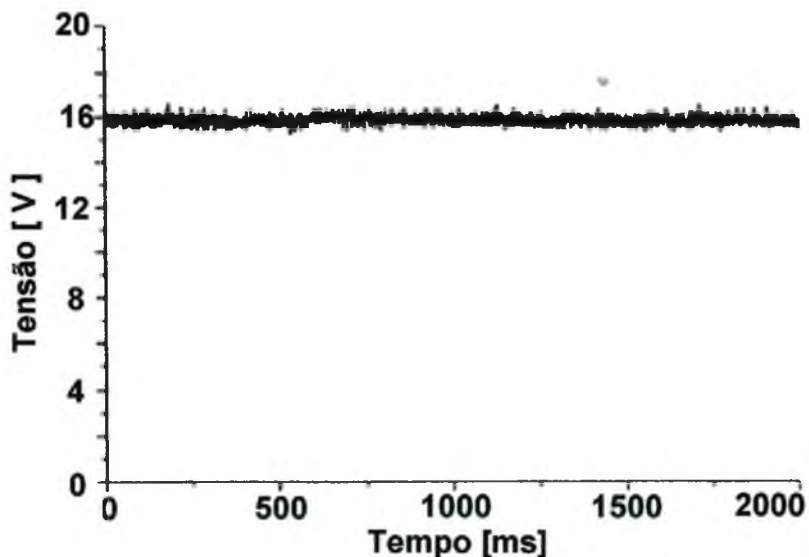


Fig. 4.5 – Oscilograma de Tensão para Velocidade Ideal de Arame [11].

Quando o arame é alimentado com velocidades muito baixas, nota-se um ruído sonoro característico da instabilidade do arco voltaico e percebe-se

visualmente que o arame não flui continuamente até a poça de fusão. Nesta condição, o oscilograma de tensão (fig. 4.6) mostra sucessivas quedas repentinas da tensão, abaixo do valor médio, numa frequência que muito provavelmente seja a de formação das gotas, decorrentes da fusão do arame numa condição de elevado nível relativo de energia, com pouco arame fundido.

Quando o arame é alimentado com velocidades bastante superiores à velocidade ideal, observa-se nitidamente freqüentes impactos do arame, ainda no estado sólido, com a peça. Isto se traduz em seguidos trancamentos do arame, ocasionando a interrupção da operação devido ao enrolamento do arame dentro do cabeçote alimentador. O oscilograma da tensão também é um indicador desta instabilidade do processo (Fig. 4.7). Neste oscilograma, cada vez que o arame entra em contato com a peça, há uma redução no valor da tensão do arco, como consequência da diminuição de seu comprimento, já que o arame passa a ser uma extensão do anodo [11].

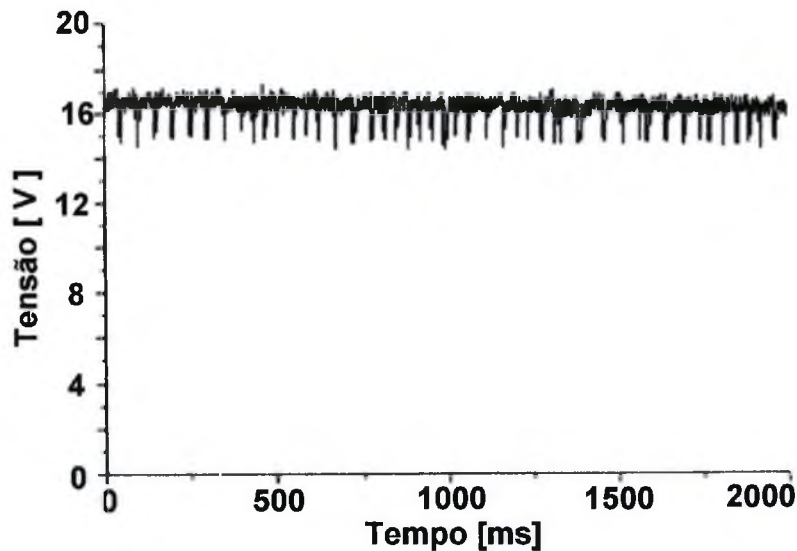


Fig. 4.6 – Oscilograma de Tensão para uma Baixa Velocidade do Arame [11]



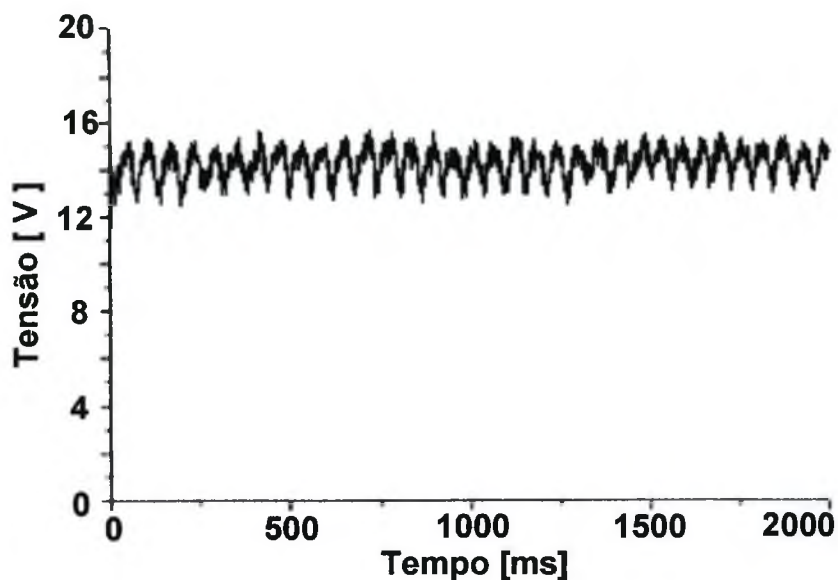


Fig. 4.7 – Oscilograma de Tensão para Excessiva Velocidade do Arame [11]

Embora exista uma velocidade ideal para a alimentação do arame em uma determinada condição de soldagem, pequenas variações em torno deste valor, dito como ideal, não comprometem significativamente a qualidade dos resultados alcançados. Esta faixa estreita define uma região recomendada para a operação adequada do processo, sem uma significativa queda da qualidade desejada para o cordão de solda.

Delgado [11] também fez estudos comparativos sobre a taxa de deposição de material confrontando o TIG com alimentação automática de arame e o processo MIG/MAG.

Utilizando a corrente como parâmetro comparativo entre as taxas de alimentação de arame, atingidas com a utilização dos dois processos, nota-se que o TIG apresenta menor taxa de deposição de material do que o processo MIG, como pode ser visto no gráfico da figura 4.8.

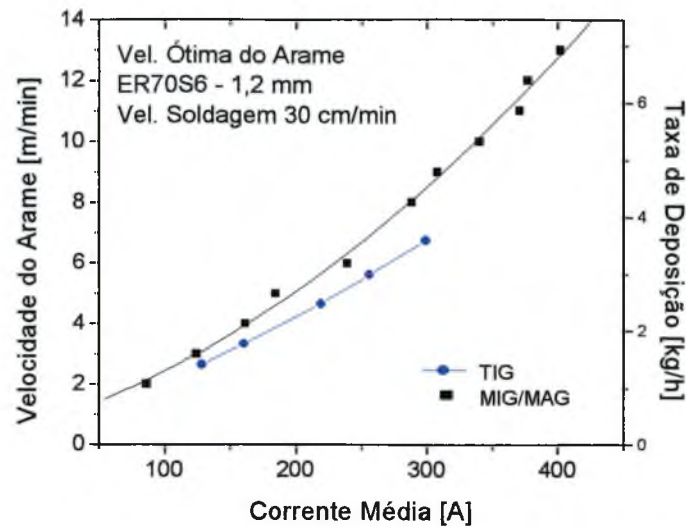


Fig. 4.8 – Comparação entre os Processos MIG e TIG Baseada na Corrente Média [11]

Em contrapartida, comparando-se os resultados de ensaios obtidos pelo processo MIG/MAG na mesma potência do arco do processo TIG com alimentação automática de arame, não é detectada diferença significativa entre as velocidades de alimentação de arame dos dois processos, mostrando que para potências mais baixas do arco voltaico o processo TIG com alimentação automática de arame possui taxas de deposição comparáveis ao processo MIG/MAG, conforme mostra o gráfico da figura 4.9.

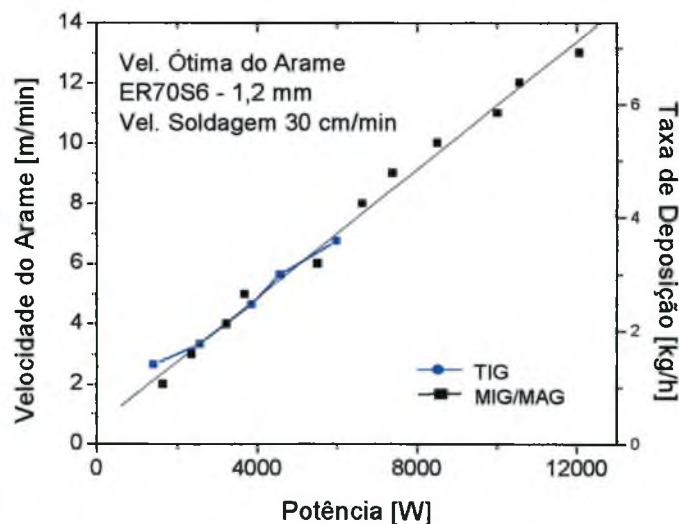


Fig. 4.9 – Comparação Entre os Processos MIG e TIG Baseada na Potência do Arco [11].

#### 4.3.2 – b - Arame Pré-Aquecido (“Hot Wire”)

Em princípio, este processo pode reunir todas as características encontradas no processo Arame Frio, porém, possui a peculiaridade de estabelecer um pré-aquecimento do arame, antes deste entrar em contato com o arco voltaico. Isto provoca um aumento na energia total do sistema, viabilizando um aumento na taxa de deposição de arame [11]. É uma técnica utilizada nos processos TIG e PLASMA.

O aquecimento é promovido pela passagem de corrente elétrica através de um comprimento determinado de arame, antes que este entre em contato com o arco voltaico.

Uma vez que o arame é pré-aquecido, podendo chegar a uma temperatura de até 300 °C, ele não absorve uma energia tão elevada do arco para se fundir, como absorveria à temperatura ambiente [11].

Meyer [12] mostra a utilização do arco PLASMA com dois arames pré-aquecidos em operações de revestimento. O arco transferido se constitui numa fonte primária de calor. Outra parcela de energia é gerada em função da passagem de corrente elétrica entre os dois arames, promovida por uma fonte de corrente alternada (fig. 4.10). Segundo Meyer, a técnica denominada de “Plasma Plus”, promove boa qualidade em revestimentos na indústria química, de petróleo e nuclear, com maiores taxas de deposição e melhor controle de microestrutura.

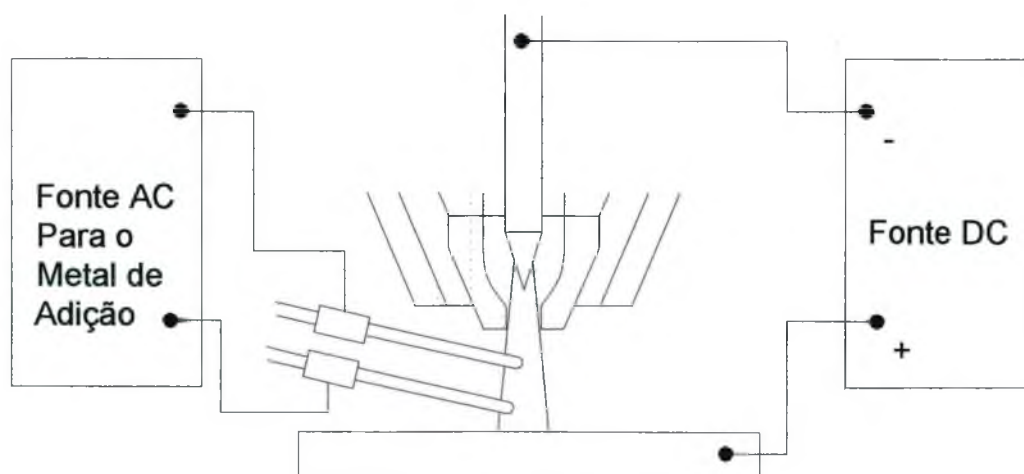


Fig. 4.10 – Desenho Esquemático do Plasma Plus



## **CAPÍTULO V**

### **OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS**

#### **5.1 - JUSTIFICATIVAS**

Muitas são as vantagens atribuídas ao processo de soldagem PLASMA quando se consulta a literatura técnica. Entretanto, estas afirmações se mostram vagas, muitas vezes direcionadas apenas para fins didáticos. Talvez a pouca difusão do processo e a retenção de conhecimentos sejam causas para tal escassez de informações.

Quando se trata do processo PLASMA com a utilização de metal de adição as dificuldades aumentam, pois a maioria da literatura se prende a características comerciais de equipamentos, não revelando informações substanciais, sejam técnicas ou científicas. Assim, o desenvolvimento de conhecimento mais aprofundado a respeito do PLASMA, principalmente com adição automática de arame, e de suas características, quando comparado aos outros processos de soldagem ao arco voltaico, se torna uma importante motivação para a condução de um trabalho.

A possibilidade de se obter depósitos de alta qualidade aliada à excelente estabilidade do arco plasma, evidenciada em trabalhos feitos anteriormente no LABSOLDA, também pode justificar a tentativa de utilização do PLASMA alimentado automaticamente na recuperação de rotores de turbinas hidráulicas.

A técnica desenvolvida pelo LABSOLDA denominada MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica, aplicada á recuperação de turbinas trouxe excelentes resultados em termos de estabilidade do arco e regularidade dos depósitos. Porém, alguns problemas ainda persistem, como é o caso de uma elevada concentração de defeitos na zona de início dos cordões de solda. No processo MIG/MAG a transferência de energia é dependente da transferência de material, o que provoca, no início dos cordões, uma deposição de material em um metal de base ainda frio, o que pode explicar a maior concentração de defeitos no início dos cordões.

Já no processo PLASMA é perfeitamente possível a transferência de energia sem nenhuma transferência de material. Permite-se, desta maneira, um pré-aquecimento localizado da peça a ser soldada de forma que, quando se inicia a adição de material, a superfície já está suficientemente aquecida, eliminando a zona defeituosa de início dos cordões.

Num contexto mais abrangente, o desenvolvimento de tecnologia de soldagem PLASMA com alimentação automática de arame pode vir a contribuir em outros campos de atuação como, por exemplo, na soldagem de união de peças, na brasagem por PLASMA e em operações de revestimentos metálicos em geral.

## **5.2 - OBJETIVOS**

Durante o desenvolvimento deste trabalho pretende-se gerar conhecimentos consolidados sobre o processo PLASMA, principalmente a respeito da soldagem PLASMA com alimentação automática de arame.

Num primeiro momento, o PLASMA sem metal de adição é abordado, com o objetivo de levantar informações a respeito da influência da distância tocha/peça e do recuo do eletrodo sobre a tensão de arco e características geométricas da zona fundida. Com estes estudos preliminares pretende-se gerar informações mais precisas a respeito da sensibilidade do PLASMA em relação ao comprimento do arco.

Os primeiros ensaios com alimentação automática de arame foram projetados para proporcionar um conhecimento básico do processo, principalmente no que se refere aos ajustes iniciais do posicionamento relativo do arame entre o arco voltaico a chapa base. Por questões econômicas nestes experimentos preliminares é utilizado aço carbono comum como metal de adição.

Posteriormente são realizados ensaios de simples deposição com adição de arame de aço inoxidável AWS 309-L e arame tubular de aço inoxidável ligado ao cobalto (CAVITEC). O primeiro utilizado nas camadas de amanteigamento e o segundo nas últimas camadas de revestimento durante os reparos em turbinas. O objetivo destes estudos é de identificar relações entre corrente, velocidade do arame e vazão de gás de plasma que permitam uma transferência estável de material, nas posições plana e sobrecabeça. Durante a seqüência destes experimentos são

realizados registros de imagens através de filmagem e fotografias para ilustrar a influência das combinações de variáveis sobre a estabilidade da transferência metálica.

Finalizando, pretende-se apresentar um conjunto de variáveis (faixa de operação) que permita operações de deposição de forma estável para os aços 309-L e CAVITEC.

## **CAPÍTULO VI**

### **EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **6.1 – EQUIPAMENTOS**

A bancada de ensaios, para o desenvolvimento da soldagem PLASMA com Alimentação Automática de Arame, foi concebida para permitir a confecção de cordões de forma automatizada em diversas posições de soldagem. A bancada permite adicionalmente o monitoramento simultâneo de quatro grandezas envolvidas com a operação de soldagem, que exercem significativa influência na qualidade dos depósitos, a saber: corrente, tensão, velocidade do arame e vazão de gás de plasma.

Na sequência, é feita uma descrição sucinta das características de cada equipamento e das funções que exerce dentro do funcionamento da bancada.

##### **6.1.1 – Fonte de soldagem MTE Digitec 450**

A fonte de soldagem MTE Digitec 450 é utilizada para impor a corrente elétrica necessária para a manutenção do arco transferido durante a condução dos ensaios. Consiste em uma fonte microcontrolada, chaveada no secundário utilizando transistores do tipo IGBT. É capaz de operar nos processos MIG/MAG, TIG e Eletrodo Revestido, com corrente contínua constante ou corrente contínua pulsada. Pode ser utilizada na soldagem PLASMA com alimentação automática de arame, desde que equipada com um módulo auxiliar, denominado de módulo plasma e de um cabeçote tracionador de arame específico para soldagem TIG e PLASMA – STA-TIG [13].

### **6.1.2 – Módulo Plasma**

Como citado anteriormente, o módulo plasma capacita a fonte MTE Digitec 450 a soldar através do processo de soldagem PLASMA, e é responsável pelas seguintes funções:

- a) Provocar as oscilações de tensão em alta frequência para permitir a abertura do arco piloto;
- b) Fornecer corrente para a manutenção do arco piloto;
- c) Controlar a abertura para passagem do gás de plasma, bem como os tempos de pré-gás e pós-gás;
- d) Monitorar a passagem de água de refrigeração para a pistola de soldagem e interromper o processo, caso falte água.

### **6.1.3 – Cabeçote Tracionador de Arame STA-TIG**

O STA-TIG foi desenvolvido no LABSOLDA para permitir a soldagem TIG e PLASMA com alimentação automática de arame. Este equipamento é capaz de tracionar arames bobinados de diversas bitolas e de diferentes materiais, com velocidades constantes ou pulsadas que variam entre 0,50 e 7,00 m/min. No presente trabalho, todos os testes foram realizados utilizando-se velocidades constantes entre 1,00 e 5,00 m/min, com incremento de 0,10 m/min [11].

### **6.1.4 – Pistola de Soldagem Plasma Adaptada**

A pistola de soldagem PLASMA é um equipamento de vital importância na realização dos experimentos.

Considerando a possibilidade de utilização do PLASMA alimentado nos reparos automatizados de turbinas, o tamanho e o peso da pistola de soldagem se tornam especificações importantes, além da corrente máxima e o fator de trabalho.

De acordo com estas considerações, foi especificada a pistola modelo PWH – 4A, fabricada pela “Thermal Dynamics Corporation”. Este modelo suporta



correntes de até 220 A em polaridade direta e pesa aproximadamente 900 g. Suas dimensões e características geométricas são apresentadas na figura 6.1 [6].

Esta pistola foi projetada para operar com eletrodo de tungstênio com 2% de tório, diâmetro de 4,8 mm e ângulo de ponta de 20°. O recuo do eletrodo pode variar entre 0 e 3,6 mm, de acordo com as características desejadas para o arco voltaico. Foi selecionado um bocal constritor do tipo longo, fornecido pelo fabricante, com orifício constritor de 3,2 mm de diâmetro. O bocal longo facilita o posicionamento do arame em relação a seu centro, enquanto que a bitola do orifício constritor favorece a formação de um arco transferido de dimensões compatíveis para acomodar em seu interior o arame de 1,2 mm de diâmetro. Este bocal é especificado para 180 A, ou níveis de corrente maiores para maiores vazões de gás de plasma.

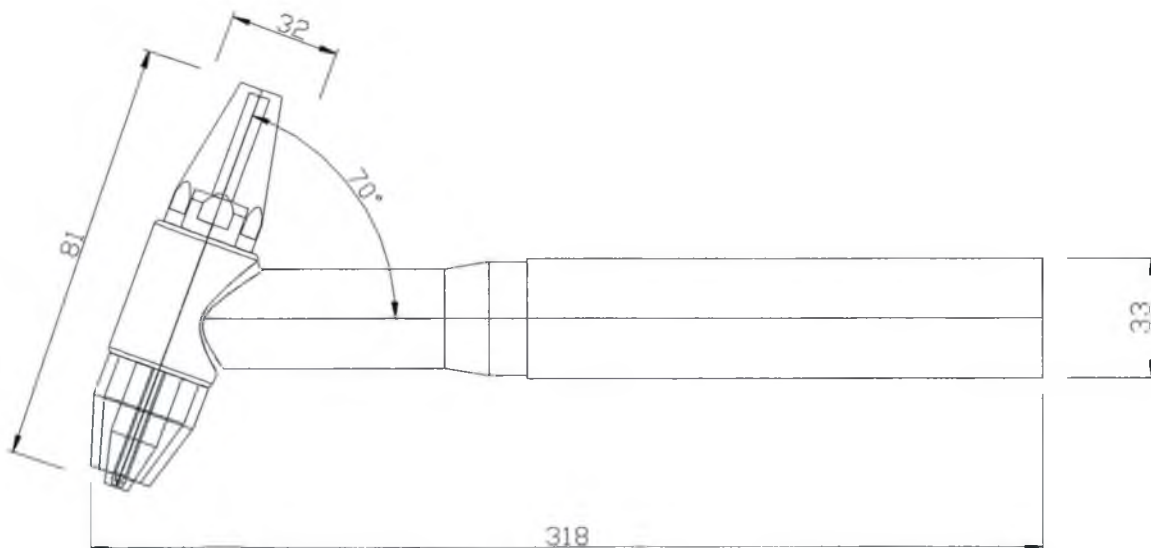


Fig. 6.1 – Dimensões da Tocha PWH – 4A [6]

O modelo PWH – 4A não é originalmente preparado para soldagem PLASMA com alimentação automática de arame. Foi necessária uma adaptação para possibilitar a soldagem nesta variante do processo PLASMA. Tomando-se como base as experiências realizadas com o processo TIG com alimentação de

aramé, foi projetado um sistema para direcionar o arame até o arco plasma, que seria acoplado a pistola especificada.

Para conduzir o arame de adição ao deixar o cabeçote tracionador, utilizou-se um conduíte de teflon paralelo aos cabos de alimentação e mangueiras de gás e refrigeração da tocha. Ao chegar próximo à extremidade da pistola, o conduíte é preso à um suporte direcionador que guia o arame até a coluna do arco.

Para garantir bons resultados na deposição de material, o suporte direcionador de arame foi projetado para atender aos seguintes requisitos:

- a) Ser facilmente adaptado à pistola especificada, possibilitando a substituição de bocais constritores e reafiações do eletrodo sem necessidade de desmontagem.
- b) Em função da possibilidade de utilização da pistola em um sistema robotizado de soldagem, o suporte deve ser leve e de reduzidas dimensões.
- c) Apresentar boa rigidez para evitar desvios acidentais do arame em função de pequenos choques com a superfície a ser reparada.

O primeiro protótipo construído, levando-se em consideração estas recomendações do projeto, é apresentado na figura 6.2, o qual foi utilizado durante todo o desenvolvimento do trabalho. O material mais empregado para a construção dos componentes do suporte foi o alumínio, em razão de suas características mecânicas aliadas ao baixo peso.

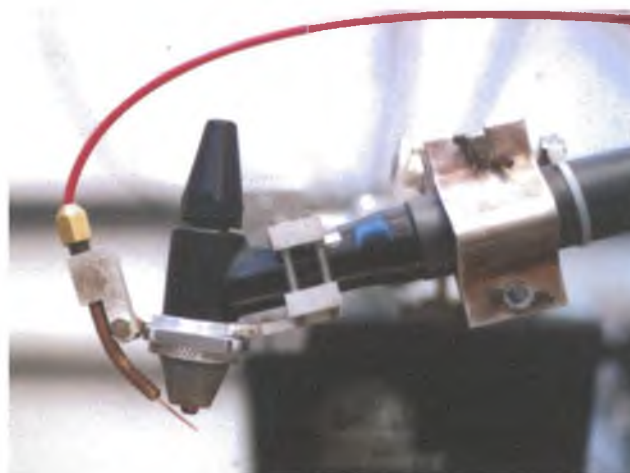


Fig. 6.2 – Pistola de Soldagem PLASMA Adaptada

O principal movimento permitido pelo suporte direcionador para ajustar o posicionamento do arame em relação ao arco voltaico, é representado na figura 6.3. Este grau de liberdade ( $\theta_1$ ) permite mudar o ponto de intersecção do arame ao longo da coluna do arco plasma.

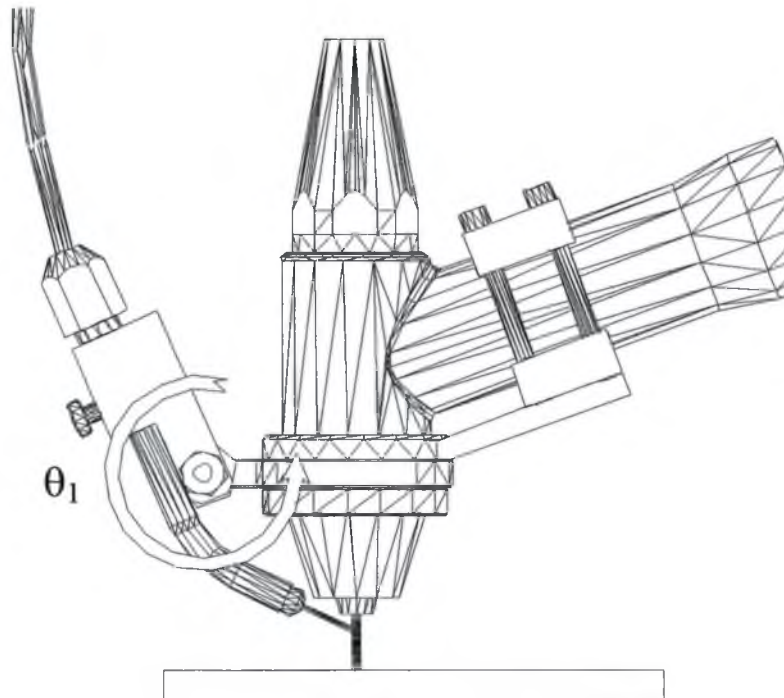


Fig. 6.3 – Grau de Liberdade ( $\theta_1$ ) do Suporte Direcionador de Arame

#### **6.1.5 – Sistema de Deslocamento de Pistola TARTÍLOPE V1**

O Tartílope V1 foi anteriormente desenvolvido para permitir a movimentação de pistolas com velocidade e posicionamento programáveis em qualquer posição de soldagem. As posições inicial e final do movimento podem ser selecionadas com resolução de 1 mm e a velocidade pode ser ajustada numa faixa de 5,0 a 160,0 cm/min com resolução de 0,2 cm/min [11]. Na realização de todos os ensaios foi utilizada velocidade de deslocamento (VS) de 20,0 cm/min ao longo de cordões de 200 mm de comprimento.



### **6.1.6 – Sistema de Aquisição e Monitoramento de Grandezas de Soldagem**

Durante a execução dos experimentos, foram monitoradas quatro importantes grandezas de soldagem:

- a) Velocidade do Arame
- b) Corrente de Soldagem
- c) Vazão de Gás de Plasma
- d) Tensão do Arco Voltaico

A corrente de soldagem e a tensão do arco foram monitoradas e registradas através de oscilogramas, com o auxílio do sistema de aquisição portátil SAP-1 (fig. 6.4) [14].

A monitoração da corrente é realizada através de um sensor de efeito Hall. Já a medição da tensão é feita através de dois cabos sensores conectados ao eletrodo ou ao arame de adição (-) e à peça de trabalho (+). Ambos os sinais passam por uma unidade de tratamento que envia os dados a um microcomputador portátil, que recebe e armazena os dados de corrente e tensão em função do tempo. Estes dados podem ser gravados para análise posterior, ou podem ser mostrados no monitor do computador na forma de oscilogramas.



Fig. 6.4 – SAP-1

Para monitorar a velocidade do arame foi utilizado o MVA-1, equipamento projetado para medir velocidades de arame de até 20,0 m/min, através de um transdutor digital de disco ranhurado. Um determinado valor de velocidade gera uma frequência proporcional de pulsos de tensão na saída do transdutor. Estes pulsos são coletados e analisados por uma unidade de tratamento de sinais, convertidos para a unidade de velocidade (m/min) e mostrados em “displays” de 7 segmentos.

A vazão de gás de plasma foi controlada através de uma válvula eletrônica de controle fechado (Tylan FC-260), onde sua abertura é proporcional a um sinal de comando de tensão. Foi utilizado, adicionalmente, um medidor digital de vazão de gás, totalmente desenvolvido pelo LABSOLDA/UFSC, com faixa de operação de 0,10 a 5,00 l/min.

#### **6.1.6 – Bancada de Filmagem**

No decorrer do trabalho, surgiu a necessidade de registrar formas peculiares de transferência de material através de filmagem e fotografia. Optou-se pela utilização de uma bancada de filmagem existente no LABSOLDA.

Para filmar processos de soldagem, a técnica básica empregada para a execução de registros fotográficos, consiste em iluminar a região do arco com uma fonte de luz externa, sendo a câmera fotográfica posicionada frontalmente à fonte de luz.

Nesta bancada utiliza-se uma fonte de laser He-Ne que gera um feixe de luz monocromática de comprimento de onda de 632,8 nm. A utilização de um conjunto de filtros e lentes adequados possibilita a eliminação parcial da luz do arco, em função da diferença do comprimento de onda do laser e da parcela de luz mais visível do arco [15].

A incorporação de um filtro especial permite a redução seletiva da luminosidade do arco em relação a luz de fundo produzida pelo laser, proporcionando que apenas uma pequena parcela da radiação luminosa do arco atinja a lente da câmera fotográfica/filmadora.

## **6.2 – MATERIAIS E MÉTODOS**

### **6.2.1 – Ensaios de Soldagem PLASMA sem Adição de Material**

Estes ensaios foram projetados para se obter maiores informações a respeito do processo PLASMA, principalmente no que se refere à influência de DTP sobre a tensão de arco e sobre a largura da zona fundida.

Visando permitir uma comparação de resultados, também foi analisada a influência do comprimento de arco sobre a queda de tensão no processo TIG. O comprimento do arco foi convencionado como sendo a distância entre a ponta do eletrodo e a superfície do corpo de prova.

Durante a execução destes experimentos, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Fonte Digitec / Módulo Plasma;
- Tartilope;
- SAP-1;
- Tocha PLASMA PWH-4A;
- Tocha TIG refrigerada para 300 A, eletrodo de tungstênio com 2% de tório, 3,2 mm de diâmetro e 30° de ângulo de ponta;

Para os ensaios com o processo TIG foi utilizado 10 l/min de argônio (99,99% de pureza) como gás de proteção. A corrente foi mantida em 100 A e a tensão do arco foi medida em cinco diferentes comprimentos de arco: 3, 5, 10, 15 e 20 mm.

Nos experimentos com o processo PLASMA, foi medida a tensão com DTP variando nos mesmos valores do comprimento do arco no TIG. Argônio com 99,99 % de pureza foi utilizado como gás de proteção e de plasma, nas vazões de 10,0 e 0,8 l/min respectivamente. O recuo do eletrodo variou de acordo com os seguintes valores: 0; 0,9; 2,3 e 3,6 mm.

Em ambos os casos, o arco voltaico foi aberto sobre uma chapa de aço carbono ABNT 1020 com superfície usinada.

Para observar a influência de DTP e da vazão de gás de plasma sobre a largura do cordão de solda no processo PLASMA, foram utilizados os mesmos valores de DTP do ensaio anterior e o recuo do eletrodo foi mantido em 2,3 mm. Os cordões foram feitos em corpos de prova de aço carbono ABNT 1020, com superfície usinada, nas dimensões de 9,5 x 50 x 200 mm. Três níveis de VGP foram utilizados: 0,8; 1,4 e 2,0 l/min e 10 l/min de vazão de gás de proteção, ambos argônio puro. A velocidade de soldagem foi mantida em 20 cm/min.

### **6.2.2 – Ensaios de Soldagem PLASMA com Alimentação Automática de Arame.**

Estes ensaios são divididos em dois subgrupos. No primeiro, denominado de ensaios preliminares, são realizados ensaios com adição de arame maciço de aço carbono comum na posição plana, com o objetivo de determinar o melhor posicionamento do arame em relação ao comprimento do arco voltaico e a melhor direção de alimentação de arame. Em seguida são realizados experimentos usando como metal de adição, arame maciço de aço inoxidável AWS 309-L e arames tubulares ligados ao cobalto com microestrutura final austenítica [13].

Todos os equipamentos citados na seção 6.1 foram utilizados na condução destas experiências.

#### **6.2.2 –a – Ensaios Preliminares com Adição Automática de Arame**

Foram testados dois pontos de intersecção arame/arco, como mostra a figura 6.5. Na figura 6.5 a, o arame é direcionado de modo a interceptar o arco a meia altura de DTP e na figura 6.5 b, o ponto de intersecção é deslocado para a superfície da poça fundida. Durante a execução destes ensaios, DTP foi mantida em 7 mm.

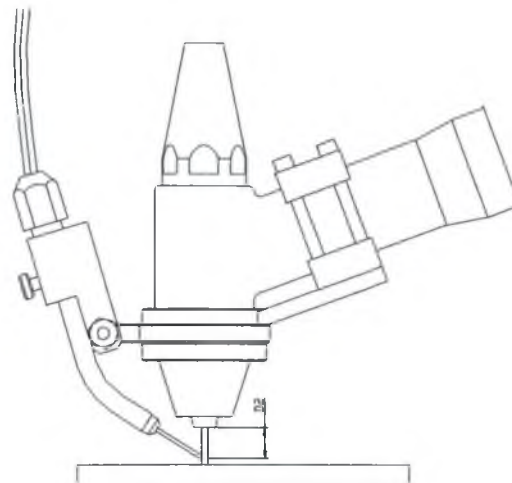
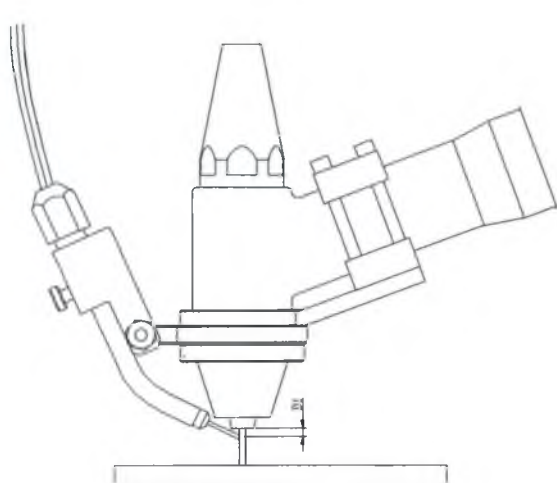


Fig. 6.5 a – Arame direcionado a meia altura      Fig. 6.5 b – Arame direcionado na poça de fusão

Duas direções de alimentação, frente e ré, foram testadas como mostra a figura 6.6.

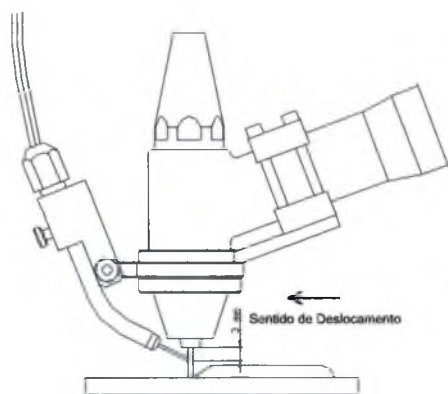


Fig. 6.6 a – Frente

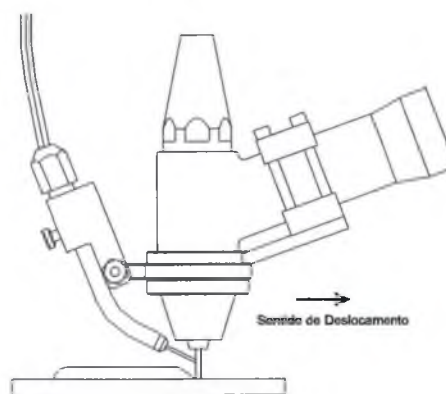


Fig. 6.6 b – Ré

Durante os experimentos com o arame sendo direcionado diretamente para a poça de fusão (fig. 6.5 b), foram utilizados os mesmos critérios desenvolvidos por Delgado [11] para determinar a velocidade ótima do arame para cada corrente de soldagem.

Este critério não pode ser utilizado quando o arame é direcionado para meia altura de DTP (fig. 6.5 b), pois não é possível identificar os choques do arame ainda sólido com o fundo da poça de fusão e, além disto, a transferência de material



não é realizada por efeito da tensão superficial. Para prosseguir com estes ensaios, um novo critério foi criado, inspirado no trabalho de Marantz [10], onde se observa a ponta do arame em relação aos limites da coluna do arco voltaico. Neste critério, de forma oposta ao que acontece com o critério de Delgado, determina-se uma faixa de velocidade ótima do arame. O limite inferior da faixa ótima ocorre no instante em que a ponta do arame penetra na coluna do arco voltaico (fig. 6.7). Já o limite superior é delimitado quando a ponta sólida do arame começa a atingir o lado oposto da coluna do arco (fig. 6.8). Neste ponto, maiores velocidades de alimentação fazem com que o arame ultrapasse toda a extensão do arco sem se fundir.

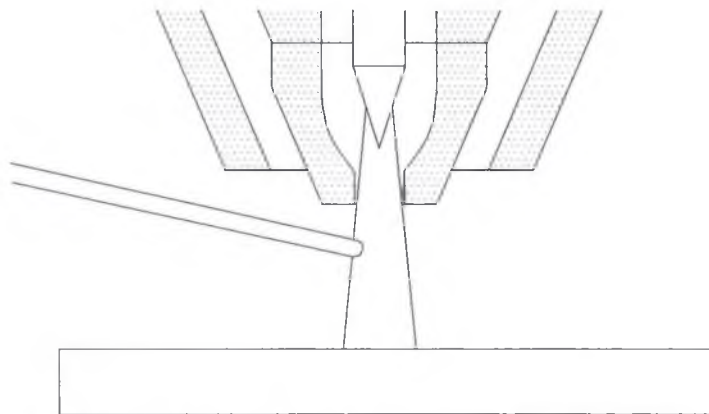


Fig. 6.7 – Início da Faixa de Velocidade Ótima do arame

O arame utilizado nestes ensaios foi o AWS-ER70S-6, maciço de aço carbono comum de 1,2 mm de diâmetro. A corrente de soldagem variou entre os valores de 100 e 150 A, de 10 em 10 A. A vazão de gás de plasma foi mantida em 2,0 l/min e a vazão de gás de proteção em 10 l/min, ambos argônio com 99,99 % de pureza. Os testes foram realizados com velocidade de soldagem de 20 cm/min, sobre corpos de prova de aço carbono ABNT 1020 de superfície usinada e dimensões de 12,7 x 250 x 200 mm.

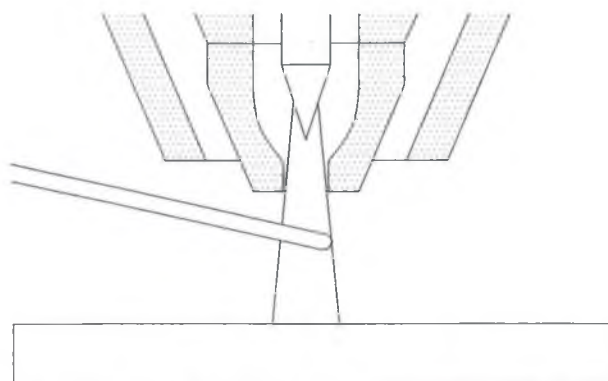


Fig. 6.8 – Final da Faixa de Velocidade Ótima do Arame

#### 6.2.2 – b – Adição Automática de Arames de Aço Inoxidável AWS 309-L e Arame Tubular Ligado ao Cobalto

O aço inoxidável 309-L é utilizado nos reparos em turbinas hidráulicas para formar uma camada intermediária entre o material que compõe a pá do rotor e o revestimento superficial duro, composto de aço inoxidável ligado ao cobalto.

Torna-se importante, desta maneira, o estudo do comportamento do PLASMA com alimentação automática de arame utilizando estes dois materiais de adição.

A deposição de arame maciço de aço inoxidável 309-L de diâmetro de 1,2 mm foi estudada, utilizando ajustes iniciais determinados a partir das experiências com aço carbono, ou seja, alimentação a Ré e a meia altura de DTP.

Para determinar a faixa de velocidade ótima do arame em função da corrente de soldagem, foi empregado o critério da posição da ponta do arame em relação à coluna do arco plasma.

A varredura da corrente foi realizada de 10 em 10 A entre os valores de 60 e 200 A. O limite inferior foi imposto pelo cabeçote tracionador de arame (STA-TIG) que não identifica correntes menores e não libera a alimentação de arame. Correntes superiores a 200 A não foram testadas devido ao comprometimento do bocal constritor.

Para o gás de plasma foi utilizado argônio (99,99% de pureza) nas vazões de 2; 2,2; 2,4 e 3,0 l/min. Para o gás de proteção foi testado argônio puro e,

posteriormente, uma mistura de 96% de Ar + 4% de CO<sub>2</sub>. A vazão de gás de proteção foi mantida em 15 l/min.

O levantamento da faixa de operação da velocidade do arame em função da corrente foi conduzido na posição plana. Posteriormente os valores ótimos de alimentação de arame foram testados na posição sobrecabeça (fig. 6.9).

Os depósitos foram feitos sobre corpos de prova de aço carbono com superfície usinada, nas dimensões de 12,7 x 200 x 250 mm.

O mesmo procedimento descrito acima foi utilizado na determinação da faixa de operação da velocidade em função da corrente para o arame tubular de aço inoxidável ligado ao cobalto.

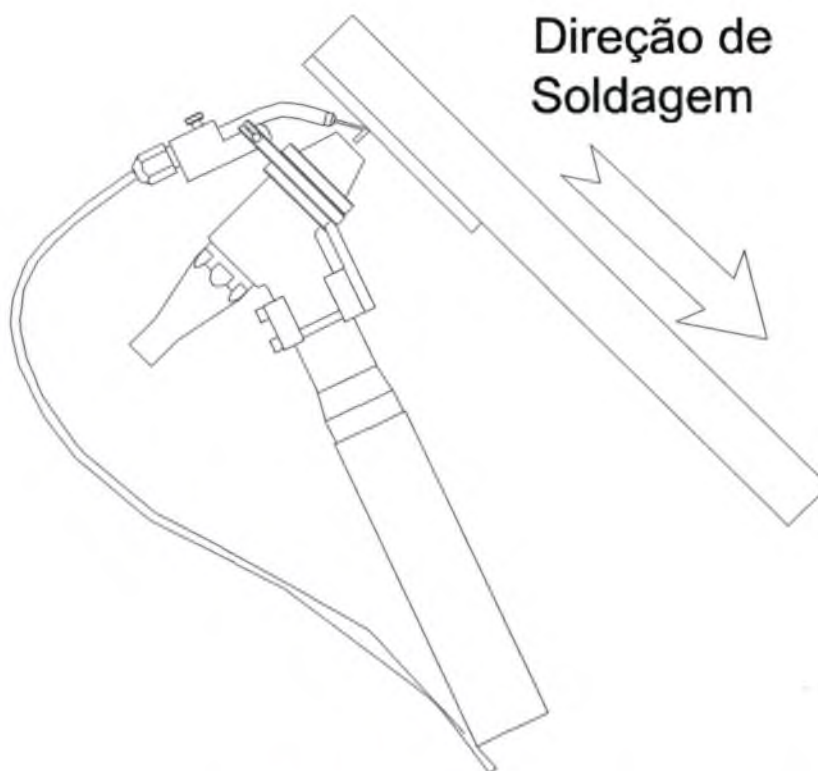


Fig. 6.9 – Soldagem na Posição Sobrecabeça



## **CAPÍTULO VII**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **7.1 – INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA TOCHA/PEÇA SOBRE A TENSÃO DO ARCO PLASMA E LARGURA DA ZONA FUNDIDA**

Esta primeira bateria de ensaios, sem deposição de material, foi realizada na tentativa de fundamentar conceitos básicos sobre o processo de soldagem PLASMA e, ao mesmo tempo, contribuir no levantamento de informações mais precisas sobre o comportamento da tensão e da largura do cordão, em função de mudanças no comprimento do arco.

Em um primeiro ensaio, a tensão do arco foi medida para alguns valores de distância tocha/peça, mantendo-se fixo o recuo do eletrodo. Obteve-se uma taxa de variação constante de 0,54 V para cada milímetro de variação em DTP, evidenciando uma relação linear e significativa entre as duas variáveis. Em seguida, o mesmo ensaio foi repetido para diferentes valores de recuo do eletrodo, objetivando identificar uma possível influência do grau de constrição do arco sobre a taxa de variação encontrada. Os resultados obtidos são apresentados na figura 7.1, onde se percebe que mesmo em elevados valores de recuo do eletrodo, a taxa de variação média permanece em torno de 0,54 V/mm.

Utilizando os mesmos dados da figura 7.1, pode-se construir um gráfico da tensão em função do recuo do eletrodo para cinco diferentes valores de DTP. O resultado é apresentado na figura 7.2, de onde obteve-se uma taxa média de variação da tensão em função do recuo do eletrodo de 2,4 V/mm.

Analisando de forma conjunta estes resultados, pode-se concluir que a taxa média de variação de tensão dentro da câmara constritora é, em média, de 2,4 V/mm, mudando bruscamente para 0,54 V/mm no momento em que o arco passa pelo orifício constritor. Possivelmente o arco plasma, dentro do bocal constritor, encontra maior resistência para manter a passagem de corrente elétrica, o que pode explicar a maior queda de tensão nesta região.

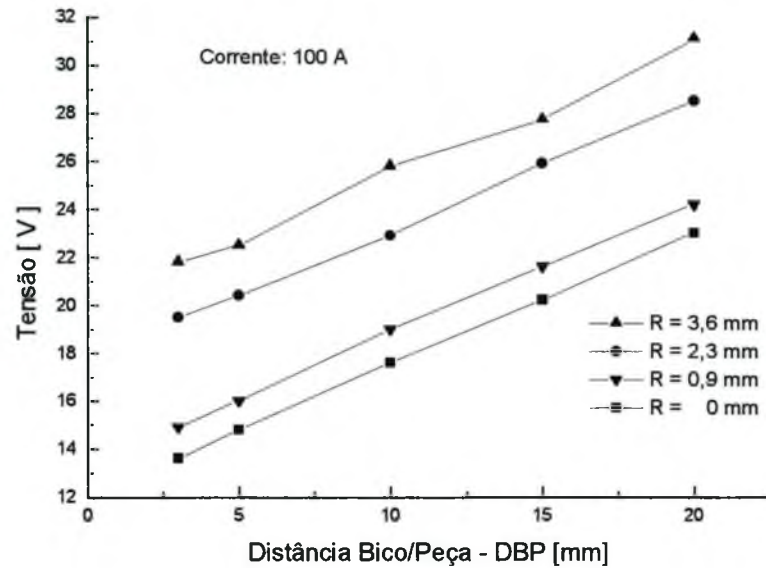


Fig. 7.1 – Influência de DTP e R sobre a tensão do arco Plasma

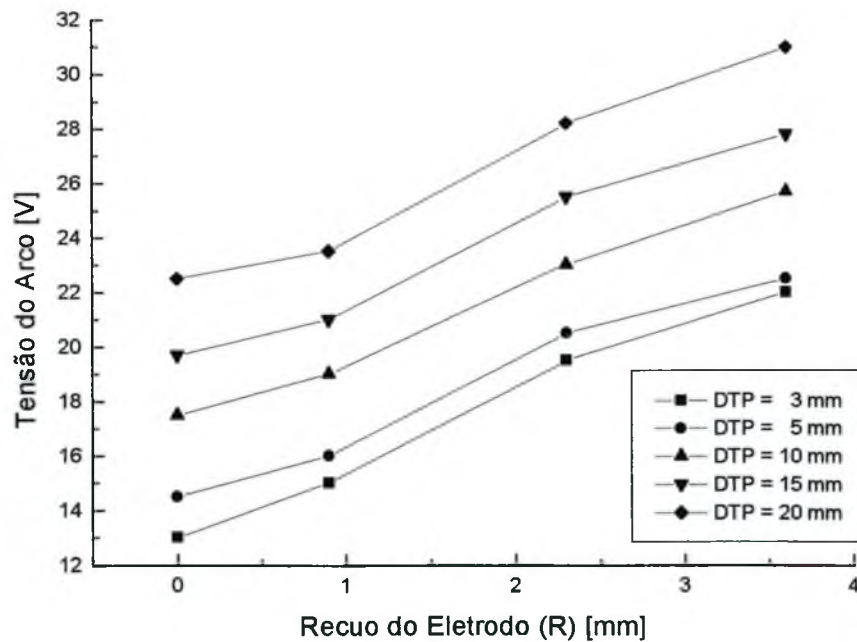


Fig. 7.2 – Tensão do Arco em Função de R

Para estabelecer um parâmetro de comparação entre taxas de variação da tensão em função do comprimento do arco, conduziu-se um experimento semelhante com o processo TIG. O resultado é mostrado na figura 7.3 e a taxa de variação calculada para estes pontos é de 0,55 V/mm. Assim, pode-se concluir que, fixando um valor de recuo do eletrodo, a tensão do arco plasma é tão sensível ao comprimento do arco quanto a tensão do processo TIG.

Este resultado era esperado, pois os dois processos são idênticos no que se refere à natureza do eletrodo e tipos de gases utilizados para a formação do arco. Um indício da veracidade desta afirmação pode ser identificado, analisando-se as figuras 7.1 e 7.3 de forma conjunta, onde o PLASMA e o TIG apresentam a mesma taxa de variação da tensão em função do comprimento de arco e, além disto, os mesmos valores de tensão para cada comprimento do arco, quando o recuo do eletrodo no PLASMA é igual a zero.

Mesmo com liberdade para assumir uma forma geométrica cônica e, por consequência, menor densidade de energia, observou-se que o arco plasma mantém um formato cilíndrico até determinado comprimento, apresentando a mesma taxa de variação da tensão do TIG.

Qualquer fluido, ao atravessar um orifício de formato circular, sofre uma aceleração e o fluxo assume o formato cilíndrico até determinada distância percorrida, dependendo da vazão que se encontra antes de passar pelo orifício. Certamente isto acontece com o fluxo de plasma ao deixar o orifício constritor, se constituindo num caminho de formato cilíndrico para a passagem da corrente elétrica. Presume-se assim que o arco transferido vai assumir o mesmo formato do fluxo de plasma, dentro das proximidades do bocal constritor.

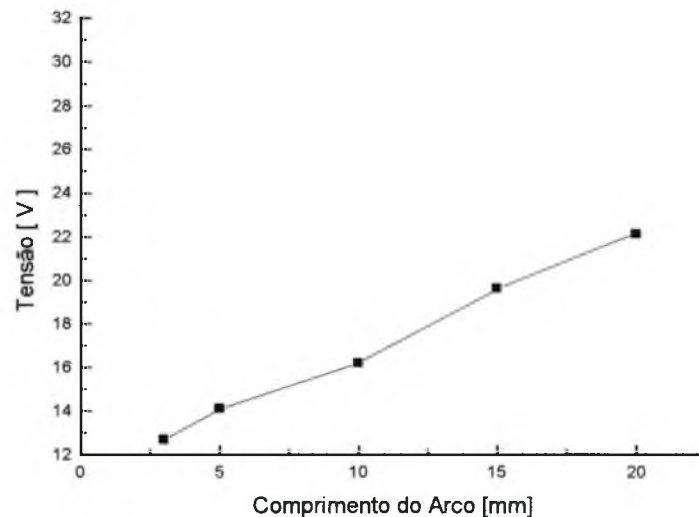


Fig. 7.3 – Influência do comprimento do arco sobre a tensão no processo TIG.

Tal qual a variação na queda de tensão, a variação na geometria da zona fundida mostrou-se dependente de DTP, como mostra a figura 7.4 e, apesar da variação da largura da zona fundida ser de pequena magnitude para mudanças em DTP da ordem de 1 ou 2 mm, o mesmo não acontece caso estas variações sejam maiores. Em se tratando do reparo das pás de turbinas hidráulicas, onde as superfícies apresentam irregularidades e raios de curvatura, variações da ordem de 5 mm não podem ser consideradas como impossíveis. Neste caso, ao contrário do que sugere a literatura, poderão ser encontradas mudanças na largura da zona fundida da ordem de 1,5 mm.

Para permitir uma comparação, foi mensurada, também, a influência do comprimento do arco sobre a largura do cordão no processo TIG. A figura 7.5 traz os resultados deste experimento. Também no processo TIG, quanto maior o comprimento do arco, menor a largura do cordão. O TIG apresentou instabilidades nos comprimentos de arco de 15 e 20 mm, formando cordões descontínuos com muitas falhas por falta de fusão. Em contrapartida, o PLASMA se mostrou estável nestes comprimentos de arco, quando utilizadas maiores vazões de gás de plasma.

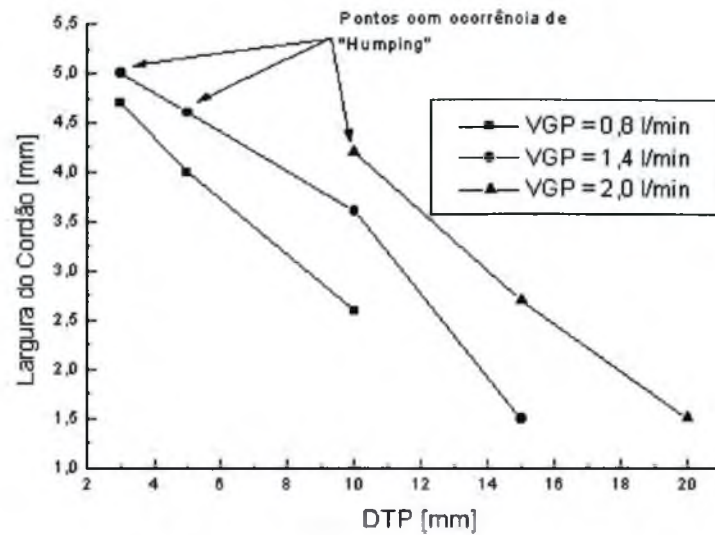


Fig. 7.4 – Influência de DTP e de VGP sobre a largura da Zona Fundida

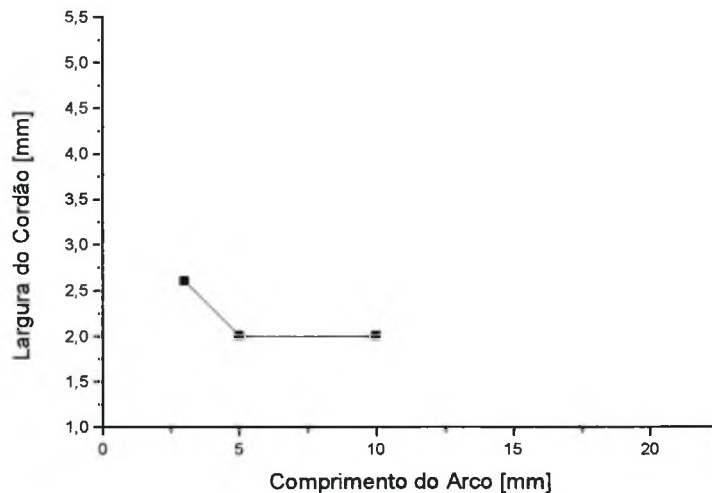


Fig. 7.5 – Influência do Comprimento de Arco Sobre a Largura do Cordão no Processo TIG.

Analisando de forma conjunta os resultados apresentados até o momento, nota-se que conforme a DTP é aumentada, ocorre um acréscimo proporcional na tensão do arco voltaico para uma mesma corrente de soldagem (fig. 7.1). Como a potência disponível no processo é calculada pelo produto tensão x corrente, o aumento em DTP causa um aumento proporcional na potência do arco. Entretanto, como pode ser observado na figura 7.4, este aumento de energia não reflete num



aumento na zona fundida do cordão, sugerindo a ocorrência de mudanças no rendimento térmico do arco ou no rendimento de fusão à medida em que se aumenta DTP.

Analisando os principais mecanismos de transferência de calor para a poça fundida apresentados por Evans [8] na figura 3.4, a radiação e convecção formam uma das parcelas de perda de energia para o meio. Presume-se, assim, que quanto maior o comprimento do arco, maior a fração de radiação emitida para o meio, o que provocaria uma redução na eficiência do arco plasma. A distribuição de temperatura apresentada por Rudaz e Welding Handbook [9 e 4], podem reforçar esta hipótese, pois apresentam um decréscimo de temperatura em pontos mais distantes do eletrodo.

Levando em conta esta possível dependência da eficiência térmica do arco em relação a DTP, algumas considerações podem ser feitas a respeito do artigo escrito por DuPont e Marder [7], onde é apresentado para o PLASMA uma eficiência térmica de  $\eta_a = 0,47$ , valor muito baixo quando comparado aos processos TIG ( $\eta_a = 0,67$ ), MIG e Arco Submerso ( $\eta_a = 0,84$ ). Em seu trabalho, Marder e DuPont mediram a eficiência térmica do TIG utilizando um comprimento de arco de 6 mm e a do PLASMA utilizando um comprimento de arco de 15 mm. Por se tratar de processos de soldagem muito semelhantes, o confronto de valores de eficiência térmica deveria ser realizado para comprimentos de arco iguais, minimizando a diferença causada pelas perdas por radiação.

A figura 7.4 também permite avaliar a influência da vazão de gás de plasma sobre a geometria da zona fundida. Mantida uma DTP constante, ao longo de uma faixa de valores, aumentos na vazão do gás de plasma (VGP) induziram a um aumento na largura da zona fundida, sem promover o aparecimento de defeitos. Entretanto, este efeito mostrou-se limitado, pois incrementos adicionais levaram ao aparecimento de "humping". Este defeito se caracteriza pela formação de regiões com protuberâncias ou vazios, intercalada por regiões onde a zona fundida apresenta aspecto normal [16]. Na soldagem TIG, a ocorrência deste defeito foi associada a um aumento da pressão do arco sobre a poça fundida, devido ao aumento da corrente. Ao ser transposto para a soldagem PLASMA, pode-se relacionar a ocorrência de "humping" ao aumento da pressão do arco voltaico, devido

ao acréscimo da vazão de gás (DTP constante) ou à aproximação da tocha em relação à peça de trabalho (VGP constante).

Estes resultados iniciais podem servir de base para a utilização do processo de soldagem PLASMA na refusão de depósitos em turbinas hidráulicas. Atualmente a refusão dos reparos é realizada através de processo TIG para melhorar sua condição superficial e facilitar as operações de esmerilhamento na correção do perfil da pá. Se a utilização do PLASMA for bem sucedida nas operações de deposição de material, o próprio equipamento de soldagem para deposição pode ser utilizado para a operação de refusão, economizando tempo na troca de equipamentos.

## **7.2 – ENSAIOS PRELIMINARES COM ADIÇÃO DE ARAME DE AÇO CARBONO ABNT 1020**

Tomando-se como base os experimentos conduzidos por Delgado [11], utilizando o processo TIG com alimentação automática de arame, foram realizados os primeiros ensaios com o processo PLASMA alimentado automaticamente, direcionando o arame para a borda frontal da poça de fusão. Com os mesmos critérios definidos para o TIG na determinação da velocidade ótima de arame para um valor de corrente, foi realizada a primeira bateria de ensaios na posição plana.

Estabilidade e boa qualidade dos cordões foram atingidas com a utilização do PLASMA com adição automática de arame na configuração descrita acima. De forma semelhante ao TIG, foi possível determinar o valor da velocidade ótima observando-se a transferência metálica do arame para a poça de fusão.

Quando se atinge um valor de velocidade de arame adequado para a corrente de arco, observa-se que o arame, ao se aproximar da base do arco, funde-se imediatamente e se transfere por efeito da tensão superficial para a poça fundida, de maneira contínua e estável. Ausência total de respingos, fumos e ruído sonoro são características marcantes desta forma de transferência de material, proporcionando cordões de aspecto liso e uniforme. Com o objetivo de facilitar a citação desta configuração em ocasiões futuras, decidiu-se denominar este modo de transferência como “Transferência por Tensão Superficial” (TTS).

A estabilidade da Transferência por Tensão Superficial, no processo PLASMA, se mostrou extremamente dependente do correto posicionamento do arame em relação ao centro da coluna do arco plasma e à superfície da chapa base. Quando o arame sofre um desvio lateral, atinge uma região mais fria do arco voltaico. Nesta região periférica, a potência disponível não é suficiente para fundir o fluxo de arame, que passa a sofrer contatos com a chapa base, provocando oscilações na tocha de soldagem. Isto exige um sistema direcionador de arame preciso e rígido, que permita o correto ajuste da posição do arame e o mantenha mesmo sob a ação de eventuais impactos.

Outro fator que influencia a estabilidade da TTS é a distância tocha/peça. Quando o processo está bem ajustado, o arame é fundido exatamente no momento em que entra em contato com a chapa base. Se DTP é aumentada, o arame fundido passa a se transferir através de pequenas gotas, descaracterizando a transferência por tensão superficial. Se DTP é diminuída, o arame sofre contatos com a superfície da chapa base antes de entrar em contato com o arco voltaico, provocando novas instabilidades.

Apesar desta forma de transferência se mostrar estável e produzir cordões de qualidade, exige um rigoroso controle de DTP, o que dificulta operações de soldagem mecanizadas em superfícies irregulares, situação comumente encontrada na recuperação de rotores de turbinas hidráulicas.

Na tentativa de amenizar a dependência do processo em relação a DTP, a posição do arame em relação ao arco foi modificada. Mantendo alimentação á frente, o arame foi direcionado de modo a interceptar o arco voltaico a meia altura entre a face do bocal constritor e a superfície da poça de fusão. Esta nova configuração permitiu maior liberdade na variação de DTP, evitando que o arame no estado sólido toque a superfície da chapa base.

Nestes ensaios, com a utilização de aço carbono como metal de adição, a transferência metálica ocorre através de pequenas gotas alinhadas, desde que a ponta sólida do arame se encontre dentro dos limites da coluna do arco.

Esta modificação no direcionamento do arame trouxe outro resultado positivo, além da maior liberdade para variação de DTP. Pelo fato do arame ser direcionado a uma região mais quente do arco voltaico, a velocidade ideal de arame



sofreu um acréscimo, quando comparada aos primeiros ensaios realizados. Isto é evidenciado com o auxílio da figura 7.6.

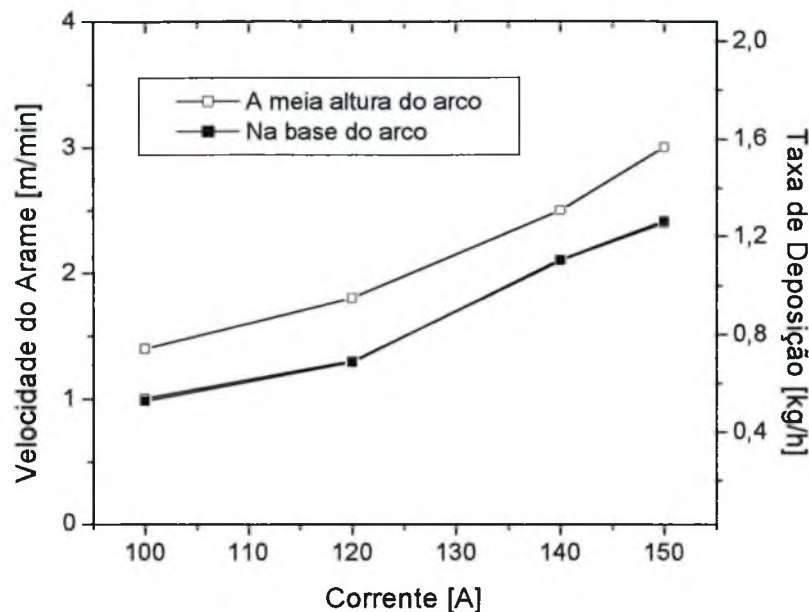


Fig. 7.6 – Faixa de Velocidades Ideais do Arame x Corrente

Pela semelhança com a transferência “Spray” do processo MIG/MAG, este modo de transferência possível no processo PLASMA foi denominado de “Transferência Goticular Axial” (TGA).

A literatura [11] especifica que o arame frio deve ser alimentado a frente do arco voltaico. Segundo Delgado, o arame alimentado na direção a Ré provoca um defeito no centro do cordão, pelo fato do arame, ainda sólido, entrar em contato com a poça e separar o metal recentemente fundido e em fase de solidificação. Isto também foi detectado no processo PLASMA a Ré utilizando a transferência por tensão superficial. Entretanto, utilizando a transferência goticular axial, este defeito desapareceu, já que o arame sólido não entra em contato com a poça fundida. Com este resultado, o PLASMA apresentou maior liberdade no posicionamento do arame em relação ao sentido de deslocamento da tocha, facilitando possíveis operações mecanizadas ou automatizadas.

Para finalizar esta primeira bateria de ensaios, foi necessário um teste para avaliar se o arco plasma teria força suficiente para conduzir as gotas de metal

fundido até a poça na posição sobrecabeça, quando utilizada TGA. O resultado deste experimento foi plenamente satisfatório, sendo que a mesma velocidade ideal do arame utilizada na posição plana ofereceu estabilidade ao processo na posição sobrecabeça.

### **7.3 – PLASMA COM ADIÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME DE AÇO INOXIDÁVEL AWS 309-L**

No item anterior, foram descritos os passos para determinar o melhor posicionamento do arame em relação ao arco voltaico e a chapa base, de modo a proporcionar maior taxa de alimentação de arame. Neste item é feita uma avaliação da configuração selecionada acima, substituindo o metal de adição de aço carbono para aço inoxidável AWS 309-L.

Foram utilizados os mesmos critérios definidos para transferência goticular axial com aço carbono no levantamento da velocidade ideal em função da corrente. Entretanto, foi determinada uma faixa de operação na velocidade do arame, e não apenas um ponto funcional para cada valor de corrente.

A mudança em outros fatores também foi testada, como é o caso da utilização de maiores valores de DTP e VGP.

A varredura no valor de corrente foi mais ampla que nos experimentos anteriores, chegando aos limites impostos pelo equipamento. Como dito anteriormente, o limite inferior de 60 A foi imposto pelo cabeçote alimentador de arame. Já o limite superior foi imposto pelos bocais constritores que apresentaram pequena vida útil com correntes maiores que 200 A.

Para um melhor entendimento e devido aos diferentes modos de transferência observados nestes ensaios, decidiu-se dividir o texto em sub-itens que tratarão, de forma detalhada, as diversas regiões de diferentes formas de transferência no relacionamento entre corrente e velocidade do arame.

7.3.1 – Caracterização do modo de transferência metálica na faixa de correntes entre 60 e 120 A.

A característica da transferência metálica nesta faixa de correntes é marcada pela baixa frequência na formação de gotas alongadas na direção do arco voltaico destacadas por efeito da gravidade. A velocidade ótima de alimentação de arame foi detectada quando tais gotas, mesmo com formato alongado, eram transferidas no centro da coluna do arco voltaico. A figura 7.7 mostra a faixa de velocidades do arame que proporciona a transferência goticular axial, entre correntes de 60 e 120 A.

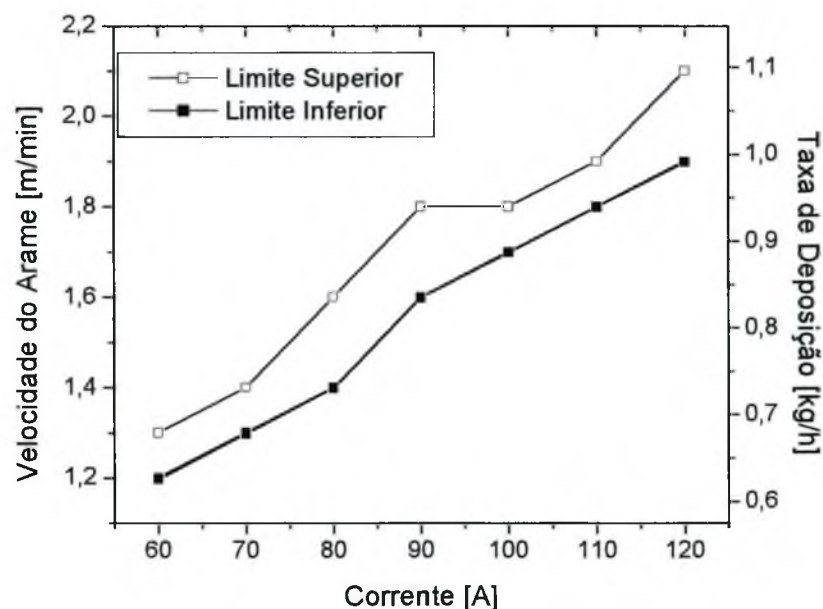


Fig. 7.7 – Velocidade Ótima do Arame e Taxa de Deposição x Corrente

Abaixo do limite inferior a formação e destacamento das gotas ocorrem antes que a ponta do arame atinja o interior da coluna do arco plasma. O cordão de solda apresenta irregularidades ao longo de sua geometria, devido à baixa frequência de destacamento das gotas, e à pequena taxa de adição de arame.

Na faixa de velocidade ótima, as gotas alongadas são formadas dentro das fronteiras do arco voltaico, mas ainda assim, são destacadas por ação da gravidade.

Algumas aquisições de oscilograma de tensão entre o eletrodo e a peça base foram realizadas, mas não foi possível observar variações significativas na tensão do arco em função do tipo de transferência metálica. Na tentativa de correlacionar o sinal de tensão para cada modo de transferência metálica, buscou-se obter um oscilograma de tensão do arame em relação à peça de trabalho. O resultado foi satisfatório, pois o arame, ao tocar o arco voltaico, assume uma tensão em relação à peça de trabalho, sendo que para cada tipo de transferência foi identificado um oscilograma correspondente.

Na figura 7.8 é apresentado um oscilograma da tensão arame/peça durante a transferência metálica entre as correntes de 60 e 120 A. Alguns picos de tensão na ordem de 10 V são observados no momento de destacamento de uma gota alongada. Em seguida a tensão volta a ficar em torno de 8,5 V, até a formação e destacamento de uma nova gota alongada.

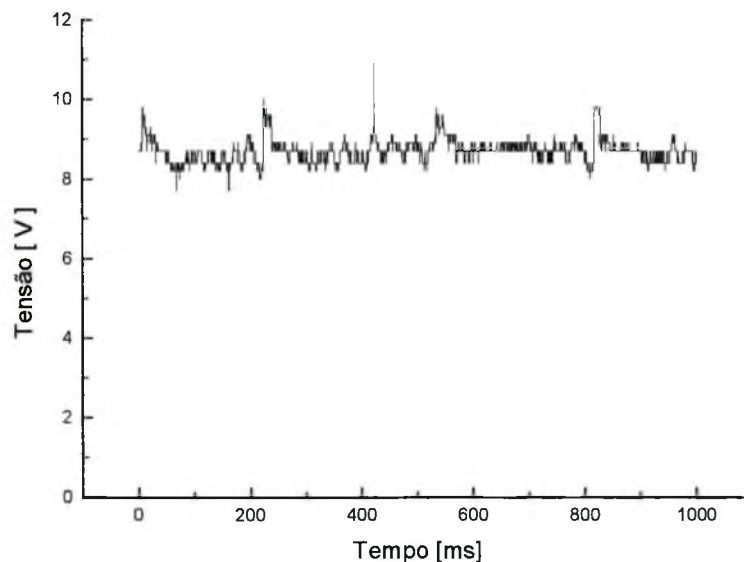


Fig. 7.8 – Oscilograma de Tensão Arame/Peça na Faixa de 60 a 120 A.

Acima do limite superior, o aspecto das gotas permanece alongado, porém o destacamento ocorre fora dos limites do arco voltaico. Incrementos adicionais na velocidade de alimentação fazem com que o arame não atinja o ponto de fusão atravessando toda a extensão do arco voltaico no estado sólido. Não houve modificações no oscilograma de tensão.

Como em todos os casos o destacamento das gotas é provocado preponderantemente pela ação da gravidade, a transferência gótica axial de gotas alongadas não é recomendada para operações de soldagem na posição sobrecabeça.

7.3.2 – Caracterização do modo de transferência metálica na faixa de correntes entre 120 e 150 A.

A partir de 120 A inicia-se a formação de gotas menores numa frequência de destacamento maior. Como a transferência de material é muito semelhante à observada com a utilização de arame de aço carbono, nesta faixa de corrente pode-se caracterizar a TGA propriamente dita.

A faixa de velocidade ótima levantada neste intervalo de correntes é apresentada na figura 7.9.

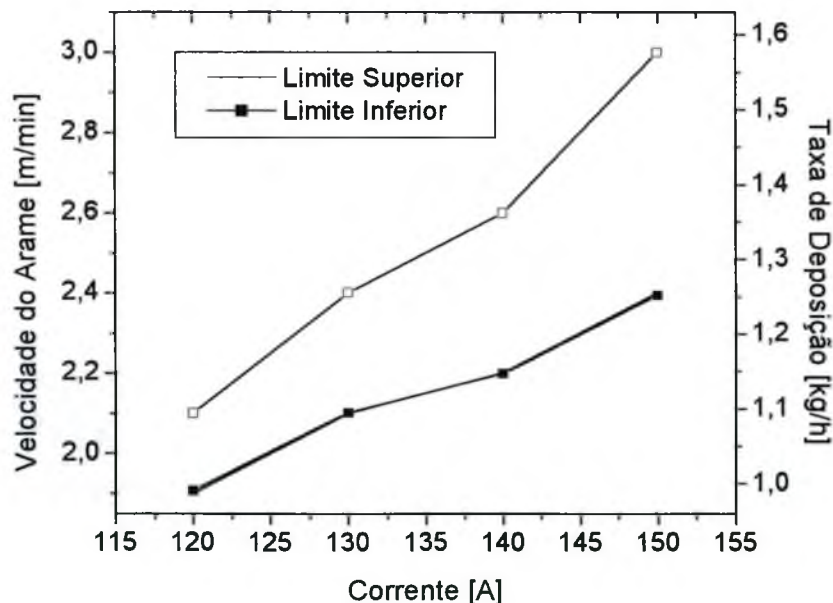


Fig. 7.9 – Velocidade Ótima do Arame e Taxa de Deposição x Corrente

A zona demarcada abaixo do limite inferior é caracterizada por pequenas gotas repelidas em diversas direções. Similarmente ao que aconteceu na adição de aço carbono, quando a velocidade de alimentação assume valores inferiores ao



ideal, são formadas e repelidas pequenas gotas antes que o arame penetre na coluna do arco. Nesta condição, a formação do cordão de solda ocorre de maneira descontínua e marcada pelo excesso de respingos.

Para uma melhor compreensão de como o fenômeno da repulsão ocorre, este modo de transferência foi fotografado (fig. 7.10). Como mostra a figura, o arame é fundido ainda nas periferias do arco voltaico, e as gotas formadas são arremessadas em diversas direções. Presume-se que, devido a sua baixa velocidade, o arame absorve uma quantidade de energia, através de radiação, suficiente para fundir, ainda longe do arco voltaico. Uma possível explicação para o fenômeno de repulsão de pequenas gotas seria o destacamento da ponta do arame na forma de metal líquido, devido ao efeito da força do arco voltaico e da velocidade do jato de plasma.

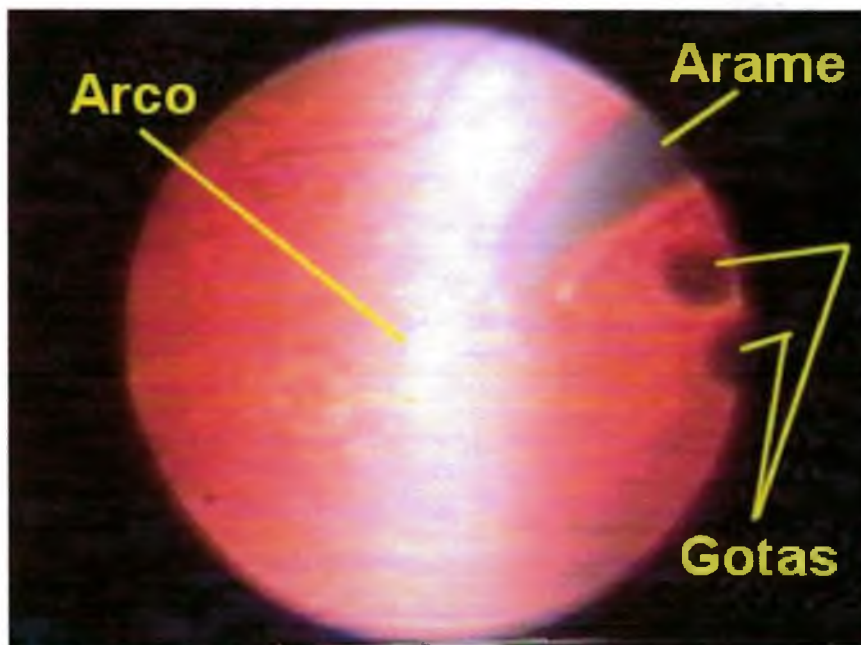


Fig. 7.10 – Pequenas Gotas Repelidas

Ao atingir a região de velocidade otimizada, as gotas passam a se destacar dentro dos limites do arco voltaico, e são direcionadas à poça de fusão de forma alinhada. O cordão de solda apresenta bom aspecto visual, com isenção de respingos.

O oscilograma de tensão arame/peça para este tipo de transferência metálica apresenta uma série de picos acima e abaixo da tensão média (fig. 7.11). Provavelmente, o decréscimo instantâneo da tensão seja provocado pela formação

de uma gota na ponta do arame. Uma vez formada a gota, no momento de seu destacamento, a tensão sofre variações instantâneas de aproximadamente 4 V. O decréscimo da tensão pode ser provocado pela aproximação da ponta do arame à peça de trabalho em função da formação de uma gota. Já o acréscimo ocorre no momento em que esta gota se destaca, aumentando a distância do arame em relação à peça de trabalho.

Devido à alta frequência de destacamento da transferência goticular axial nestes valores de corrente, presume-se que as gotas são arremessadas à superfície da chapa base em função da pressão do arco voltaico. Este modo de transferência, utilizando aço inoxidável 309-L, foi testado na posição sobrecabeça e apresentou resultados satisfatórios, pois o arco voltaico oferece força suficiente para arremessar as gotas de metal fundido para cima, vencendo a ação da gravidade.

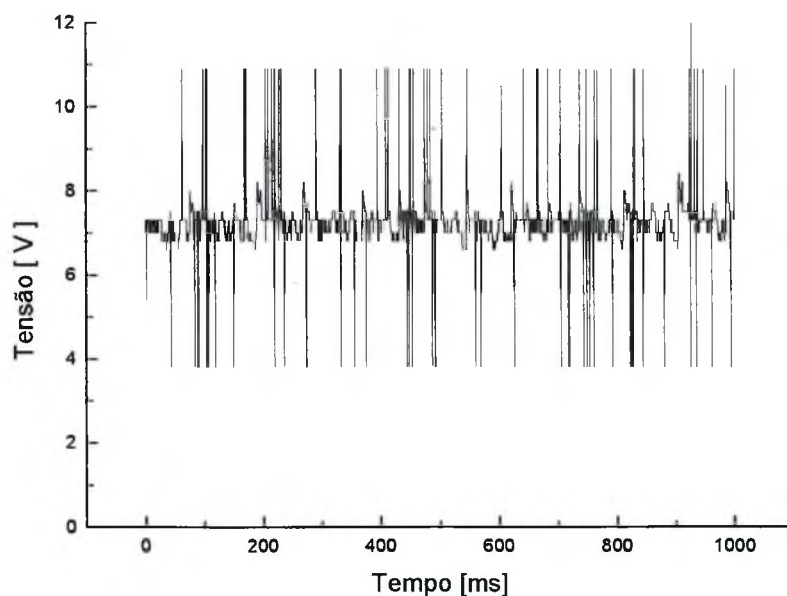


Fig. 7.11 – Oscilograma de Tensão da Transferência Goticular Axial

Quando o limite superior é ultrapassado, gotas que apresentam diâmetro maior que o diâmetro do arame são formadas e permanecem unidas ao arame sólido até o contato com o material de base quando, por tensão superficial, transferem-se para a poça fundida. Na figura 7.12 é apresentado um registro fotográfico feito deste

tipo de transferência e mostra como a ponta do arame no estado sólido atravessa toda a extensão do arco voltaico.

Neste caso, o oscilograma de tensão (fig. 7.13) apresenta um aspecto muito semelhante ao da transferência por curto-circuito do processo MIG/MAG. A gota da ponta do arame precisa tocar a peça de soldagem para que ocorra uma transferência por tensão superficial, provocando um curto circuito entre o arame e a peça de soldagem.

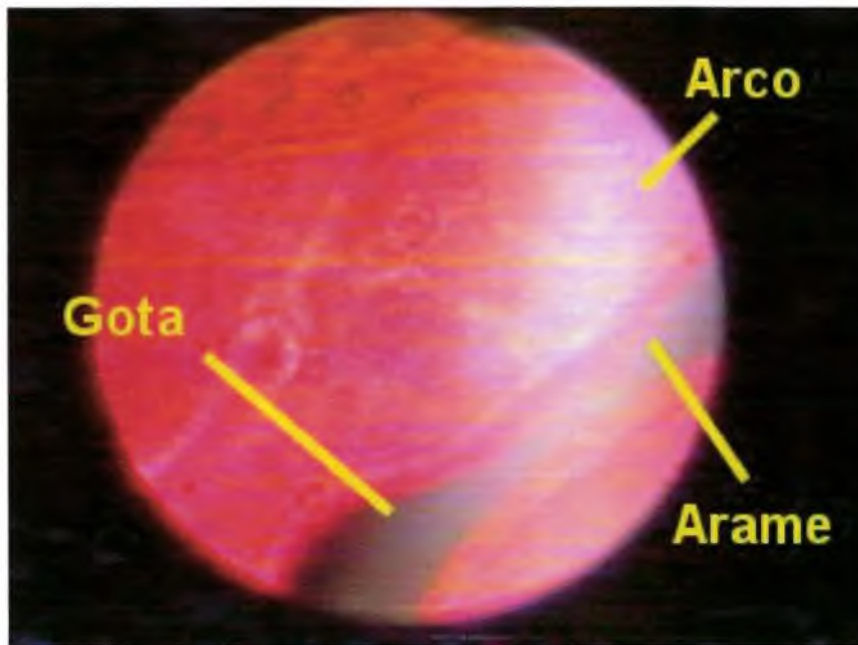


Fig. 7.12 – Formação de gotas acima do limite superior.

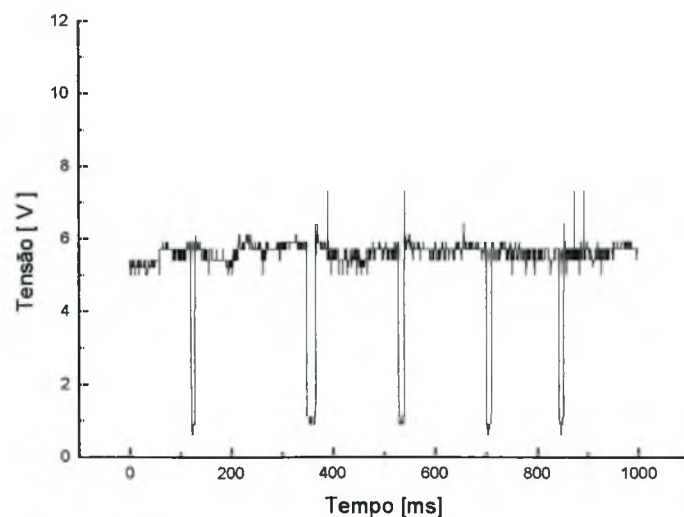


Fig. 7.13 – Oscilograma de Tensão na Transferência de Gotas Grandes por Tensão Superficial



### 7.3.3 – Caracterização do modo de transferência metálica com correntes entre 150 e 200 A.

Ainda direcionando o arame à meia altura entre o bocal constritor e a superfície da chapa base, prosseguiu-se no levantamento da relação entre velocidade ótima do arame e corrente de soldagem. Para atingir correntes superiores a 150 A, o valor de VGP precisou ser aumentado, de acordo com instruções do fabricante da tocha, de forma a garantir a vida útil do bocal constritor.

O resultado destes testes é apresentado na figura 7.14.

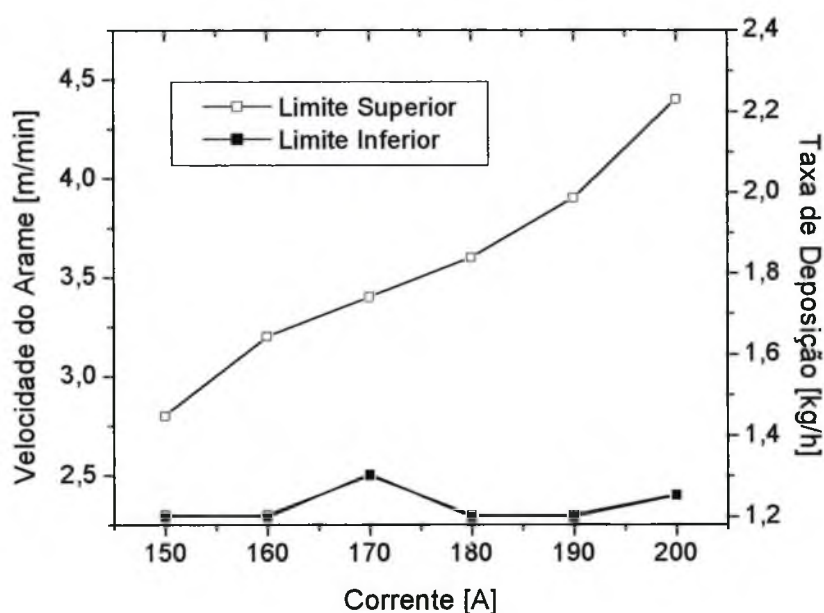


Fig. 7.14 – Velocidade Ótima do Arame e Taxa de Deposição x Corrente

Da mesma forma como aconteceu na faixa de correntes anterior, velocidades de arame abaixo do limite inferior provocaram a formação de pequenas gotas repelidas. Um fato muito peculiar desta faixa de correntes estudada é a estabilização do limite inferior da velocidade do arame em torno de 2,4 m/min para qualquer corrente utilizada acima de 150 A. Isto começa a oferecer indícios de que o limite inferior para velocidade do arame passa a ser independente a partir de um

determinado valor de corrente. Na seqüência do texto, serão dadas possíveis explicações a respeito deste fenômeno.

Ao atingir a região de velocidade ótima, a transferência metálica passou a acontecer de forma nova e inesperada, sem registros encontrados na literatura. Caracterizado por um excelente nível de estabilidade, sofrendo pouca influência de DTP, este modo foi denominado de “Transferência Filamentar” (TF), devido a formação de uma ponte de metal líquido, com o aspecto de um filamento, dentro do arco voltaico entre a ponta sólida do arame e a poça de fusão.

A figura 7.15 apresenta o registro fotográfico de TF, conseguido com o auxílio da bancada de filmagem/fotografia equipada com um canhão laser.

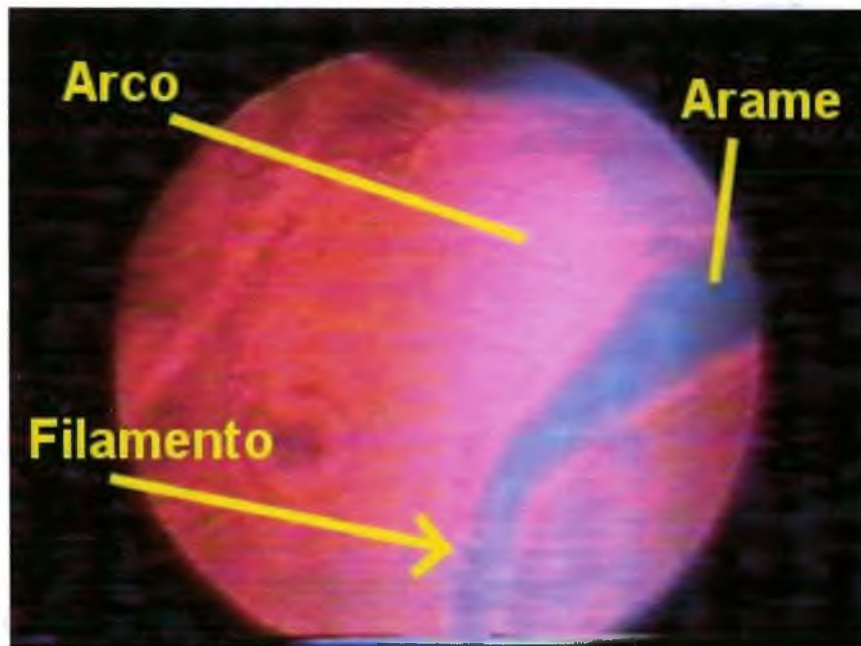


Fig. 7.15 – Registro Fotográfico da Transferência Filamentar

O oscilograma neste modo de transferência retrata a estabilidade da transferência metálica mantendo o valor da tensão muito próximo ao de uma linha contínua horizontal, como mostra a figura 7.16.

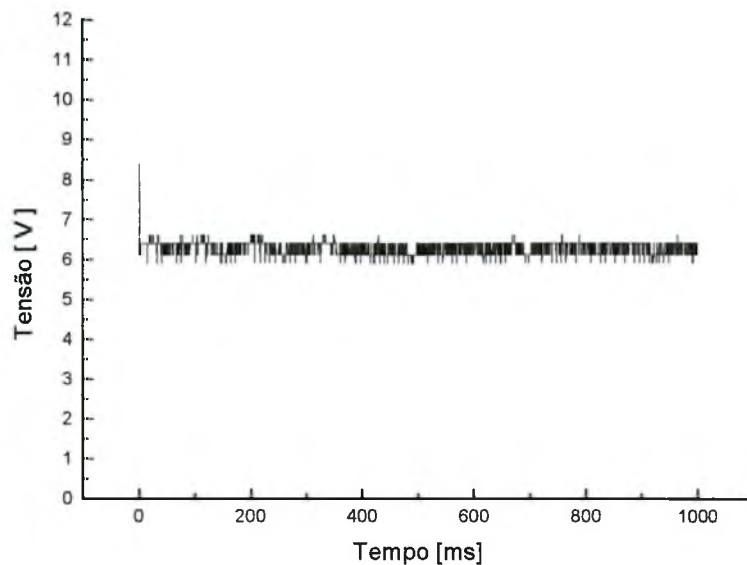


Fig. 7.16 – Oscilograma da Transferência Filamentar.

Este modo de transferência foi testado de forma manual e mecanizada, nas posições plana, vertical descendente e sobrecabeça, apresentando excelente estabilidade e maior liberdade na variação de DTP. Os cordões obtidos através desta técnica apresentam boa regularidade, molhabilidade e isenção total de respingos.

A figura 7.17 mostra as três formas de transferência obtidas, em função da corrente e da velocidade do arame.

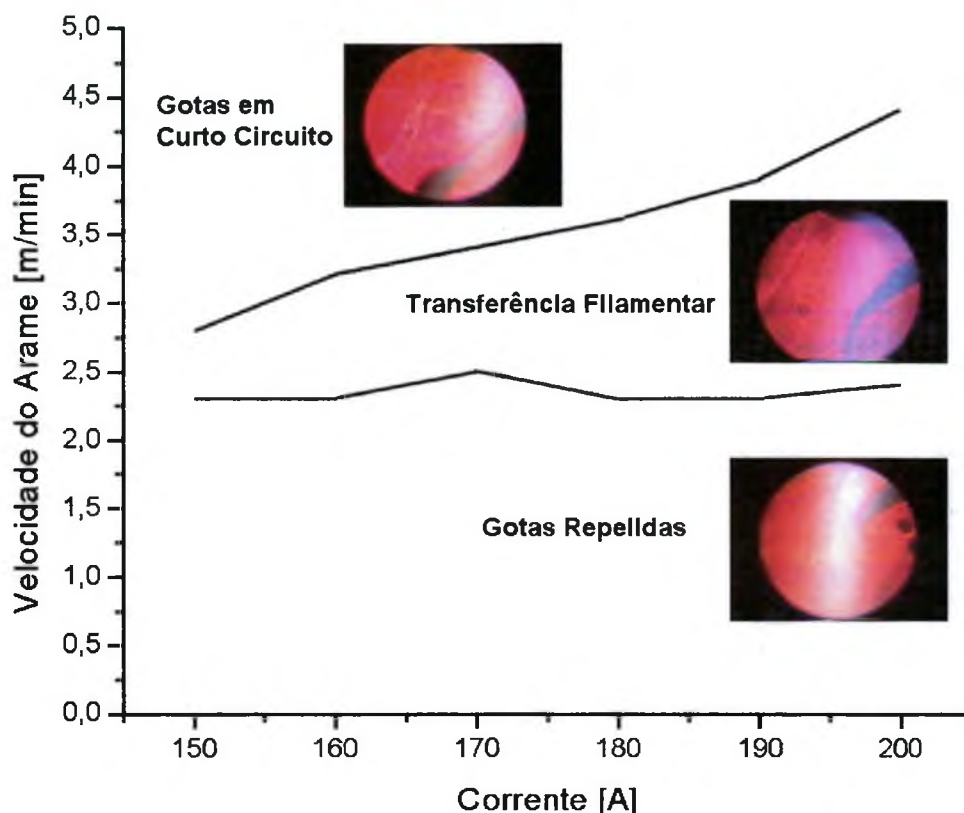


Fig. 7.17 – Formas de transferência em função da corrente e velocidade do arame

Na execução manual de depósitos na posição sobrecabeça verificou-se a facilidade na manutenção de um processo estável, mesmo variando DTP entre valores de 6 e 15 mm. Esta característica é vista como uma importante vantagem deste modo de transferência, principalmente para o trabalho de recuperação automatizada de pás erodidas por cavitação, que podem apresentar superfícies irregulares e raios de curvatura.

A transferência filamentar pode ser descrita como um escoamento contínuo de metal líquido entre a ponta do arame e a poça de fusão. Uma analogia na natureza para este fenômeno é o escoamento de água em uma torneira. Quando a abertura da válvula é muito pequena, o fluxo de água ocorre através de gotas, liberadas, pela ação da gravidade, à uma frequência bastante baixa. Conforme se promove a abertura gradual da válvula, as gotas começam a se soltar em frequências cada vez maior, até que formam um filete contínuo de água. O fluxo de

metal líquido de aço 309-L ao longo da faixa de velocidades estudada é muito semelhante ao fluxo de água em uma torneira sendo gradualmente aberta. No fluxo de água, as forças responsáveis pelo escoamento é a ação da gravidade e a pressão interna na tubulação. Na transferência filamental do processo PLASMA, além da força gravitacional, estão presentes a pressão do arco voltaico e a força de arraste do jato de plasma. Esta combinação de forças, aliada às características físicas do metal líquido em altas temperaturas, como viscosidade e tensão superficial, podem permitir o escoamento contínuo do fluido incandescente.

Procurando uma melhor caracterização da transferência filamental, decidiu-se pela condução de ensaios com diferentes vazões de gás de plasma, na esperança de se detectar influências sobre os limites inferior e superior da velocidade ótima do arame. Os resultados obtidos com os diversos valores de VGP são apresentados na figura 7.18.

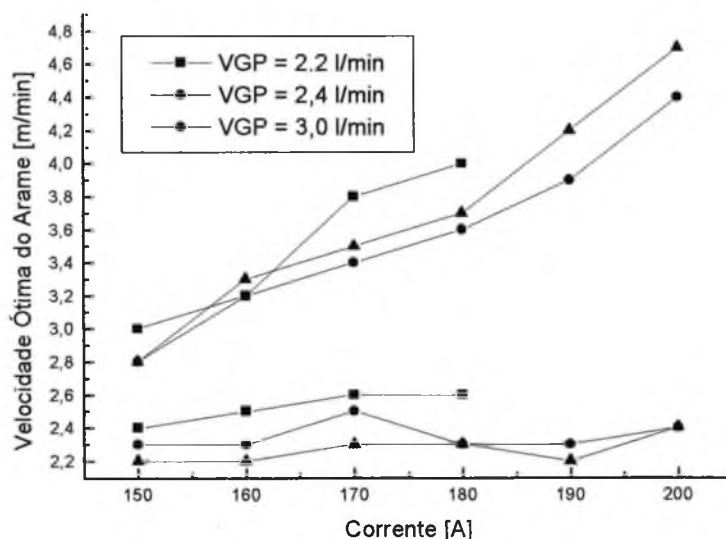


Fig. 7.18 – Faixa de Velocidade Ótima de Arame para Diversas VGP's

Analisando as três curvas geradas pelos três níveis de vazão de gás, nota-se que a diferença entre os valores das linhas limites é insignificante. É difícil identificar qualquer influência da vazão de gás sobre a velocidade ideal de alimentação de arame e sobre a forma de transferência de metal. No limite inferior da velocidade ótima, para todas as VGP investigadas, percebe-se uma distribuição dos



pontos em torno de 2,3 m/min, reforçando a idéia da independência da velocidade mínima do arame em relação à corrente de soldagem.

Utilizando VGP de 2,2 l/min observa-se que a máxima corrente atingida foi de 180 A, sendo que acima deste valor, o bocal constritor é inutilizado. O aumento do valor de VGP para 2,4 e 3,0 l/min, permitiu o uso de correntes de até 200 A sem danos no bocal constritor. Esta constatação revela concordância com a recomendação dada pelo fabricante da tocha de soldagem de utilizar maiores vazões de gás de plasma para maiores níveis de corrente.

#### **7.4 – PLASMA COM ADIÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME DE AÇO INOXIDÁVEL LIGADO AO COBALTO (CAVITEC)**

Nos experimentos com adição de arame tubular de aço inoxidável ligado ao cobalto, observou-se um comportamento da transferência metálica muito semelhante ao observado com a utilização de arame AWS 309-L. Os mesmos resultados de velocidade ótima do arame e formas de transferência metálica foram obtidos nas faixas de corrente de 60 a 120 A e de 120 a 150 A. No entanto, não foi observada a formação do filamento na faixa de corrente de 150 a 200 A, como aconteceu na utilização de arame sólido de aço inoxidável. Nesta região, a transferência permaneceu na forma de pequenas gotas alinhadas (TGA).

Com o objetivo de simplificar a apresentação dos resultados, as três faixas de corrente analisadas são apresentadas no mesmo gráfico, como mostra a figura 7.19. Ao longo da região apresentada como velocidade ótima de adição de arame, somente a partir de 120 A é possível a deposição de material na posição sobrecabeça, condição a partir da qual o arco voltaico possui força suficiente para impulsionar as gotas de metal fundido, vencendo a ação gravitacional.

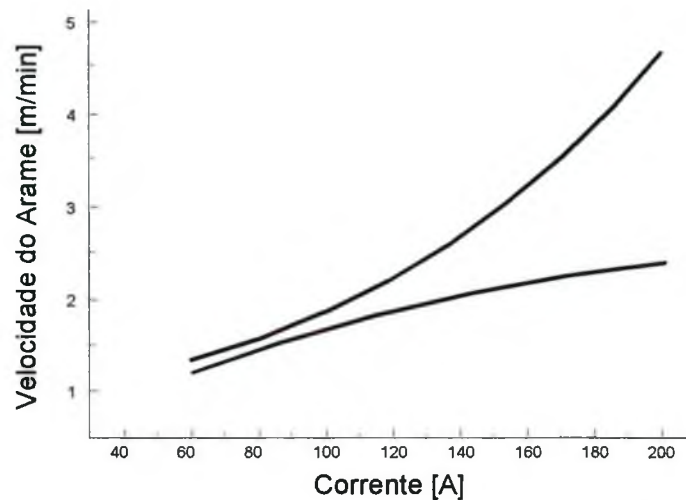


Fig. 7.19 – Faixa de Velocidades Ótimas para Arame Tubular de Aço Inoxidável Ligado ao Cobalto

## 7.5 – ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE MISTURA DE ARGÔNIO/CO<sub>2</sub> COMO GÁS DE PROTEÇÃO

Apesar da excelente estabilidade do processo de soldagem PLASMA com alimentação automática de arame AWS 309-L na faixa de velocidade ótima levantada, os cordões de solda utilizando velocidade de deslocamento de 20 cm/min e argônio puro como gás de proteção não apresentaram molhabilidade e largura satisfatórias. A figura 7.20 mostra a seção transversal de um cordão realizado nestas condições com 180 A e 3,5 m/min de velocidade de arame, depositado sobre uma chapa fria de 12,7 mm de espessura. Como pode-se perceber a molhabilidade do depósito é muito deficiente, fato que aliado à sua pequena largura, em torno de 5 mm, dificultaria a execução de um revestimento plano.

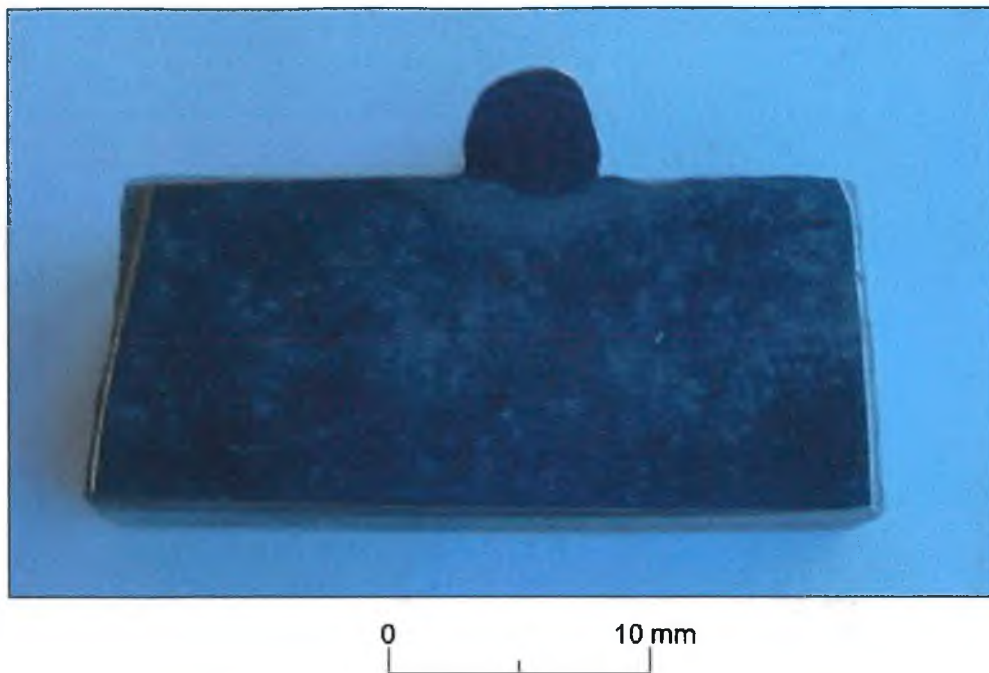


Fig. 7.20 – Cordão de Solda Confeccionado com Argônio Puro como Gás de Proteção

A questão da molhabilidade afetou também a primeira tentativa de realizar um revestimento metálico sobre uma chapa de aço carbono comum, com duas camadas de Aço Inoxidável 309-L e duas camadas de Aço Inoxidável ligado ao Cobalto. As duas últimas camadas, que correspondem ao metal de revestimento externo nas pás do rotor, compostas de aço ligado ao cobalto, apresentaram uma alta concentração de poros, como mostra a figura 7.21. Durante a operação de revestimento, observou-se que a formação de cordões adjacentes não ocorre de forma suave e contínua. A poça metálica é formada exatamente no “pé” do cordão anterior, sem apresentar molhabilidade satisfatória. Quando ocorre um crescimento da poça fundida, esta se desloca bruscamente através do pé do cordão anterior, de forma intermitente, aprisionando gases e impurezas, prováveis causadores dos poros.



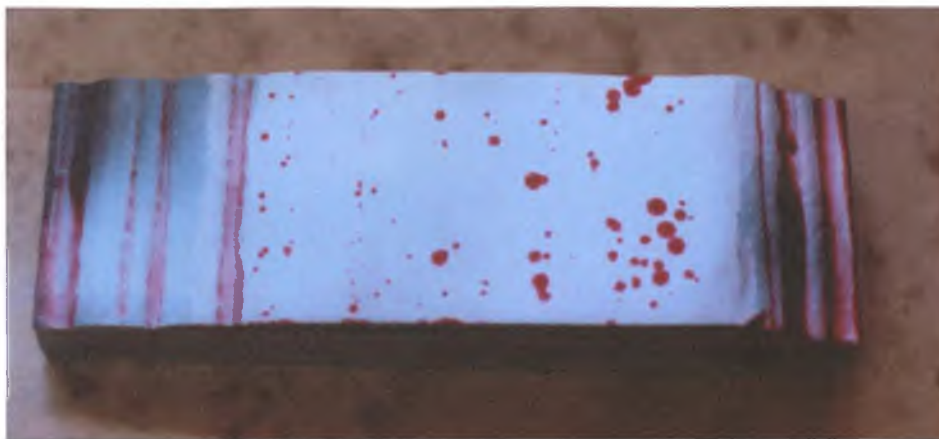


Fig. 7.21 – Depósito de Aço Inoxidável Ligado ao Cobalto com Defeitos de Porosidade

A utilização da mistura ativa de 96% Ar + 4% CO<sub>2</sub> foi testada com a intenção de melhorar a molhabilidade e largura dos cordões realizados, bem como diminuir a ocorrência de poros quando utilizado Argônio puro como gás de proteção. Apesar da literatura raramente citar a utilização de gases de proteção ativos no processo PLASMA, no processo MIG estas misturas são amplamente utilizadas para melhorar a molhabilidade de cordões de solda. Como o eletrodo de tungstênio, diferentemente do que ocorre no processo TIG, fica protegido dentro da câmara de constrição pelo gás de plasma, este sim obrigatoriamente de natureza inerte, permite-se a utilização de gases de proteção ativos no processo PLASMA, sem deterioração do eletrodo.

A relação de mistura de apenas 4% de CO<sub>2</sub> foi especificada com a intenção de não oferecer riscos de contaminação no aço inoxidável a ser depositado. A figura 7.22 mostra o excelente resultado oferecido apenas pela utilização da mistura ativa no gás de proteção. Visivelmente houve um aumento na molhabilidade do cordão e, adicionalmente, sua largura saltou de 5 mm quando se utilizou argônio puro para 8 mm quando se utilizou a mistura ativa.

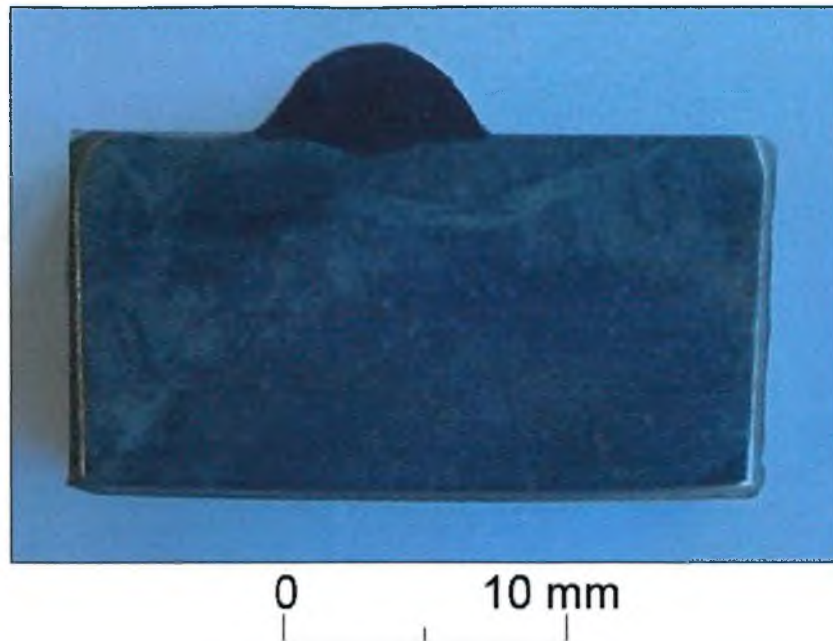


Fig. 7.22 – Cordão de Solda Confeccionado com Mistura de 96% Ar + 4% CO<sub>2</sub>

O aumento da molhabilidade do cordão de solda, em consequência da utilização de CO<sub>2</sub> no gás de proteção, traz também o aumento da fluidez da poça fundida durante a soldagem. Para verificar se o banho não escorreria em função desta maior fluidez da poça fundida, foi realizado um cordão na posição sobrecabeça, utilizando aço inoxidável 309-L como metal de adição. O resultado, plenamente satisfatório, é apresentado na foto da figura 7.23. A estabilidade da transferência filamentar foi mantida e a fluidez da poça fundida não ofereceu riscos de escorrimentos de metal líquido.



Fig. 7.23 – Cordão de Solda de Aço Inoxidável 309-L Confeccionado na Posição Sobrecabeça com mistura de Ar + CO<sub>2</sub> no Gás de Proteção

Finalmente foram realizados ensaios de deposição de cordões lado a lado, na posição sobre cabeça, utilizando a mistura ativa, para avaliar a superfície bruta dos depósitos. A figura 7.24 mostra um depósito realizado com aço 309-L, na posição sobre cabeça.

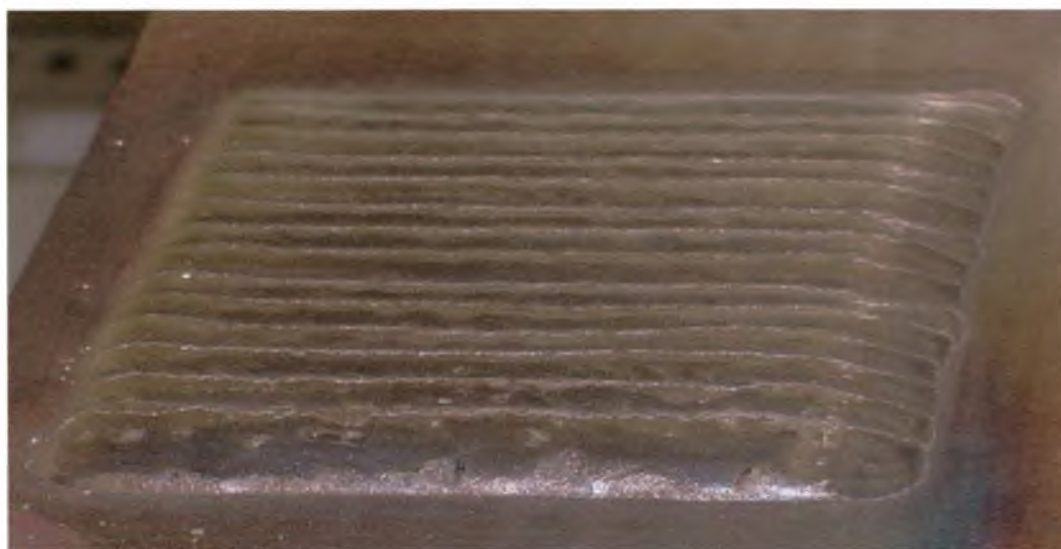


Fig. 7.24 – Depósito de Cordões Lado a Lado, Utilizando Arame AWS 309-L

A adição de  $\text{CO}_2$  no gás de proteção também trouxe importantes resultados na redução de porosidades nos depósitos de CAVITEC. Isto pode ser evidenciado comparando as fotos das figuras 7.21 (utilizando argônio puro) e 7.25 (utilizando a mistura ativa). A redução da porosidade provavelmente ocorreu em função da melhor molhabilidade do cordão realizado com a mistura ativa, onde a poça de fusão se desloca ao longo do pé do cordão anterior de forma mais contínua e suave, permitindo a expulsão de gases e impurezas presentes na superfície previamente depositada.

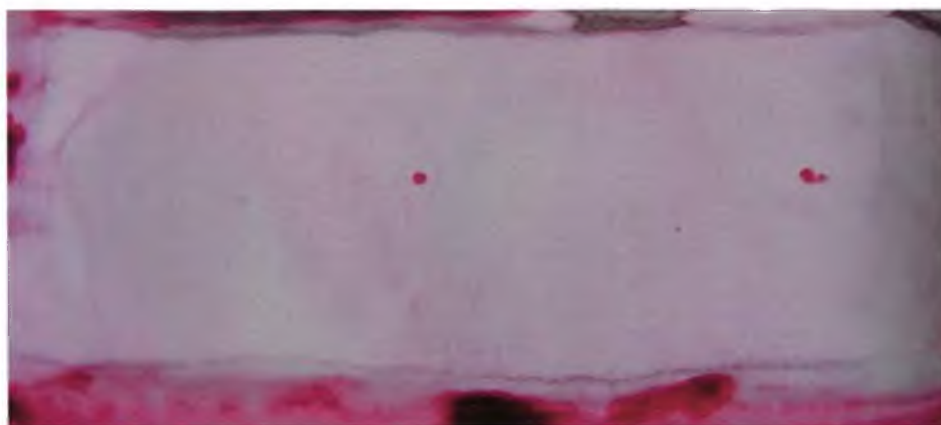


Fig. 7.25 – Ensaio Líquidos Penetrantes em Amostra de Deposição de CAVITEC com Mistura Ativa no Gás de Proteção

## **7.6 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO PLASMA COM ALIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ARAME**

No início do trabalho, existiam expectativas de que o PLASMA poderia trazer uma maior taxa de deposição, quando comparado com o TIG, em função da maior potência utilizada no PLASMA para uma mesma corrente de soldagem. Entretanto, isto não foi observado na prática, como mostra a figura 7.26. Estes dados, retirados do trabalho de Delgado (para o TIG) e do comando sinérgico da fonte Digitec (para o MIG/MAG) revelam que o PLASMA possui praticamente a mesma taxa de deposição que o TIG para uma determinada corrente de soldagem. O TIG e o PLASMA apresentam uma menor taxa de deposição, quando comparados ao processo MIG/MAG.

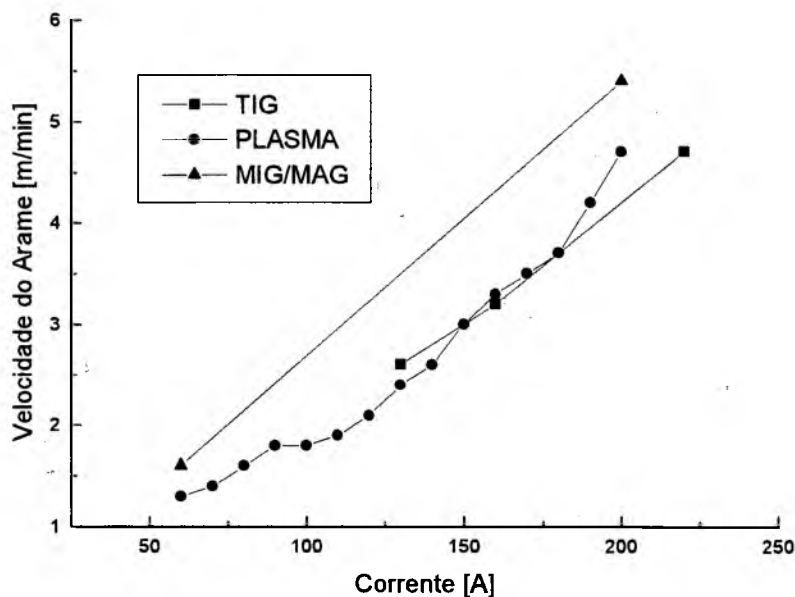


Fig. 7.26 – Taxa de Deposição dos Processos TIG, MIG/MAG e PLASMA em Função da Corrente do Arco

Delgado também comparou as taxas de deposição do processo MIG e do processo TIG, tomando-se a potência do arco como parâmetro de comparação e concluiu que o TIG e o MIG/MAG possuem a mesma taxa de alimentação de arame em função deste parâmetro. Entretanto, quando estes dois processos são comparados com o processo PLASMA, nota-se que ainda assim o PLASMA apresenta menor taxa de deposição (fig. 7.27). Isto contraria algumas expectativas iniciais deste trabalho, pois acreditava-se que o PLASMA, justamente por apresentar uma maior potência do arco deveria ter condições de permitir uma maior taxa de deposição. Neste caso, a explicação mais provável se encontra na diferença do rendimento dos processos, principalmente por que no PLASMA se utilizou um maior comprimento de arco.

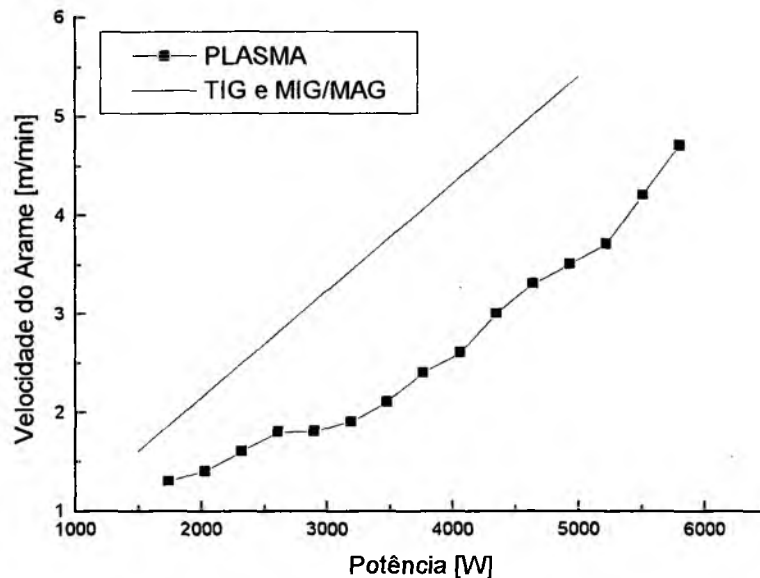


Fig. 7.27 – Taxa de Deposição dos Processos TIG, MIG/MAG e PLASMA em Função da Potência do Arco

Mesmo não atingindo uma alta taxa de produção, o PLASMA apresentou uma série de vantagens sobre os processos MIG/MAG e TIG. Uma delas é a excelente estabilidade na transferência metálica observada durante os experimentos conduzidos neste trabalho. Mesmo com altas correntes e elevadas taxas de alimentação de arame, o processo se mostrou capaz de produzir cordões de excelente qualidade na posição sobrecabeça e vertical descendente.

Durante os depósitos, percebe-se o quanto é importante a pressão do arco sobre a poça fundida para a manutenção de um banho estável na posição sobrecabeça. Além disto, a pressão do arco, provocada pela corrente e principalmente pela velocidade do jato de plasma, permite o “arremesso” de material líquido para cima, vencendo a ação da gravidade. Este fato pode ser encarado como uma vantagem do PLASMA em relação ao TIG, pois a pressão do arco permite a deposição de material independentemente do efeito da tensão superficial. Assim, o PLASMA permite um bom trabalho de revestimento automatizado ou mecanizado, mesmo em superfícies com certo grau de irregularidades.

Outra vantagem do PLASMA em relação ao processo TIG com alimentação de arame foi observada na maior durabilidade do eletrodo de tungstênio,



no que se refere a contaminações e manutenção de sua afiação original. Isto se deve à existência de uma dupla proteção conferida ao eletrodo no processo PLASMA, em função de sua própria natureza, a saber:

- a ação do bocal constritor, impedindo o contato físico do eletrodo tanto com a poça fundida quanto com o metal de adição;
- a ação do jato de PLASMA que impede que respingos ou outras partículas tenham condições de penetrar pelo orifício constritor e chegar até a ponta do eletrodo.

Em relação ao processo de soldagem MIG/MAG, a principal vantagem do PLASMA é a isenção total de respingos ou salpicos quando utilizada a transferência filamentar, o que pode reduzir os danos em equipamentos automatizados que ocorrem, principalmente na posição sobrecabeça.

## **CAPÍTULO VIII**

### **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- O estudo da soldagem PLASMA com alimentação automática de arame, revelou que o processo apresenta potencialidade para operações de revestimentos metálicos, oferecendo excelente estabilidade fora da posição plana. Altos níveis de qualidade foram alcançados com a utilização de arame de aço inoxidável 309-L, através do modo de transferência filamentar, identificado no decorrer do trabalho;

- A utilização da mistura ativa (96% Ar + 4% CO<sub>2</sub>) no gás de proteção melhorou sensivelmente a molhabilidade dos cordões e reduziu drasticamente a porosidade nos depósitos de arame tubular ligado ao cobalto (CAVITEC);

- Apesar de oferecer menor taxa de consumo de arame que os processos TIG e MIG/MAG, o PLASMA com alimentação automática de arame apresentou vantagens que podem justificar sua utilização nos reparos de turbinas hidráulicas, entre elas:

- Maior vida útil do eletrodo, quando comparado ao processo TIG;
- Isenção total de respingos na formação dos depósitos;
- Bom desempenho na manutenção da estabilidade da poça fundida na posição sobre cabeça;
- Possibilidade de realização de um pré-aquecimento localizado na peça para minimizar concentração de defeitos no início do cordão, comumente encontrados em depósitos realizados através do processo MIG/MAG;

- A possibilidade de realizar deposições sem necessidade de contato do arame com a poça de fusão confere ao PLASMA maior liberdade para operações mecanizadas/automatizadas em superfícies com certo nível de irregularidades. Esta seria mais uma das vantagens que o PLASMA oferece diante do processo TIG;

- A determinação da faixa operacional da velocidade do arame, em função da corrente para os dois tipos de arame testados, pode ser incorporada em



comandos sinérgicos para uma utilização simplificada do processo de soldagem PLASMA com alimentação automática de arame;

Mesmo com todas estas vantagens observadas durante a condução do trabalho, algumas análises e experimentos devem ser conduzidos para qualificar os depósitos realizados com o processo de soldagem PLASMA, entre eles:

- Ensaios de cavitação acelerada;
- Avaliação da diluição dos cordões
- Levantamento do perfil de dureza
- Análise metalográfica, para qualificar a microestrutura dos depósitos

Além destes experimentos a serem realizados, deve ser conduzido um levantamento da produtividade dos processo PLASMA e MIG/MAG, no que se refere a relação da quantidade de arame consumido e a quantidade de material que efetivamente fica nas pás do rotor da turbina, após a operação de esmerilhamento/polimento.

Nos depósitos de arame tubular ligado ao cobalto (CAVITEC), a utilização de 4% CO<sub>2</sub> no gás de proteção melhorou sensivelmente a incidência de porosidades. Entretanto, outras misturas, como adição de O<sub>2</sub> devem ser testadas, bem como diferentes níveis de vazões de gás de proteção e de plasma na tentativa diminuir ainda mais a incidência de tais defeitos.

Devido à excelente estabilidade na transferência metálica, sem dúvida a principal característica do processo PLASMA alimentado, recomenda-se experiências com outros materiais de adição, em operações de revestimento, soldagem de união e brasagem de peças.

## CAPÍTULO IX

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – DIAZ, V. M. V. **Influencia de parâmetros e variáveis da soldagem plasma sobre as características da solda com ênfase na análise da abertura e no fechamento do keyhole.** 1999. 113f. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [2] – MARQUES, P. V. **Tecnologia da Soldagem.** Belo Horizonte: ESAB, 1991. 352 p.
- [3] – MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos.** Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996. 457 p.
- [4] – Welding Handbook. AWS, V. 2 – **Welding Process.** Eighth Edition, 1991.
- [5] – PAULA Jr., O. S. **Desenvolvimento e aplicação da soldagem plasma pela técnica keyhole.** 1997. 111 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis
- [6] – Thermal Dynamics Corporation. **Instruction manual n. 0-2231.** Estados Unidos, 1985. 25 p.
- [7] – DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. **Thermal efficiency of arc welding process.** Welding Journal, Estados Unidos, v. 74, n 12, p. 406-s – 416-s. dez. 1995.
- [8] – EWANS, D. M.; McCLURE, J. C.; NUNES, A. C. **Arc efficiency of plasma arc welding.** Welding Journal, Estados Unidos, v. 77, n 2, p. 53-s – 58-s. fev. 1998.
- [9] –
- [10] – MARANTZ, D. R., KOWALS, K. A. **Wire arc plasma: a new contender in metal spraying.** Welding Journal, v. 70, n. 8, p. 46 – 50, ago, 1991.
- [11] – DELGADO, L. C. **Estudo do processo de soldagem TIG com alimentação automática de arame.** 2000. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis

- [12] – MEYER, J. J. **Plasma puls: hot-wire filler speeds deposition.** Welding Design & Fabrication. Estados Unidos, p 80 – 84, abr. 1976.
- [13] – Departamento de Eng. Mecânica – UFSC, Instituto de Soldagem e Mecatronica. **MTE DIGITEC 450.** Manual de Instruções. Florianópolis, 1998, 1ª Edição.
- [14] – Departamento de Eng. Mecânica – UFSC, Instituto de Soldagem e Mecatronica. **SAP-1.** Manual de Instruções. Florianópolis, 1998, 1ª Edição.
- [15] – BAIXO, C. E. I. **Registro Fotográfico do arco e relações paramétricas tensão/corrente – duas metodologias para o estudo da soldagem MIG/MAG.** 1990, 148 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [16] – SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. **Effect of arc force on defect formation in GTA welding.** Welding Journal, v. 58, n 7, p 212-s – 224-s, jul, 1979.